



HAL
open science

Pertinence d'un modèle couplé trafic et émission de polluants utilisant une approche agrégée de modélisation du trafic à l'échelle urbaine pour l'évaluation environnementale

Amélie-May Lupinski

► To cite this version:

Amélie-May Lupinski. Pertinence d'un modèle couplé trafic et émission de polluants utilisant une approche agrégée de modélisation du trafic à l'échelle urbaine pour l'évaluation environnementale. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-03184716

HAL Id: dumas-03184716

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03184716v1>

Submitted on 29 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État

Année 2018-2019

Voie d'approfondissement :
Transport – Ingénierie de la mobilité

Soutenu le mardi 3 septembre 2019

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Ludovic LECLERCQ
- Maître de TFE [ou Tuteur] : Delphine LEJRI
- Expert : Pierre-Antoine LAHAROTTE

Par

Amélie-May LUPINSKI

Pertinence d'un modèle couplé trafic et émission de polluants utilisant une approche agrégée de modélisation du trafic à l'échelle urbaine pour l'évaluation environnementale

**Organisme d'accueil :
Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports (LICIT),**

LICIT



IFSTTAR

Notice analytique

AUTEUR	
Nom	LUPINSKI
Prénom	Amélie-May
ORGANISME D'ACCUEIL	
Nom de l'organisme et Localité	Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports (LICIT) – ENTPE, 3 rue Maurice Audin 69120 Vaulx-en-Velin –
Nom du Tuteur	Delphine LEJRI
ANALYSE DU TFE	
Titre (français)	Pertinence d'un modèle couplé trafic et émission de polluants utilisant une approche agrégée de modélisation du trafic à l'échelle urbaine pour l'évaluation environnementale.
Titre (anglais)	Relevance of a coupled traffic and pollutant emission model using an aggregate traffic modeling approach at the urban scale for environmental assessment.
Résumé (français)	<p>La pollution atmosphérique générée par le trafic routier constitue un enjeu majeur en termes de santé publique et d'environnement. Un des axes de travail du laboratoire du LICIT porte sur la gestion du trafic avec deux objectifs : fluidifier le trafic et réduire les émissions de polluants atmosphériques à échelle urbaine. Le laboratoire dispose d'un modèle de trafic MFD performant, développé à grande échelle urbaine et s'appuyant sur l'approche « multi-réservoirs ». Ce modèle de trafic a été couplé au modèle d'émissions COPERT développé au sein du projet européen MAGNUM.</p> <p>Afin d'étudier la pertinence de ce modèle couplé pour l'évaluation environnementale, le modèle couplé trafic-émission a été appliqué sur la métropole de Lyon, avec un découpage spatial de la métropole en 10 réservoirs. Le modèle de trafic avait été précédemment calé sur la base de données 2011. Les résultats de ce modèle ont alors été fournis au modèle d'émission COPERT pour estimer les émissions de polluants (CO₂ pour l'environnement ; NOx et PM10 pour la santé) à l'échelle de la ville. D'autre part, l'accès à des données plus récentes et plus riches a permis d'étudier l'influence du calage du modèle couplé trafic-émissions. Ainsi, une partie du travail a consisté à réaliser une seconde simulation couplée avec les données 2018, puis à comparer les résultats d'émission 2011 et 2018. Ces derniers ont ensuite été comparés aux données 2018 d'ATMO Auvergne Rhône Alpes.</p> <p>Les résultats montrent que les nouvelles données d'entrée 2018, bien que plus riches en informations, n'améliorent pas les résultats de la simulation 2011.</p> <p>Par ailleurs, la comparaison des résultats des simulations avec les données ATMO montre qu'en l'état actuel, le modèle couplé trafic-émission ne permet pas d'estimer de manière satisfaisante les émissions de polluants CO₂, NOx et PM10. De plus, les contributions respectives des réservoirs aux émissions globales ne suivent pas la tendance décrite par ATMO, des réservoirs voyant leur</p>

	<p>contribution soit plus, soit moins importante par rapport aux mesures ATMO.</p> <p>Enfin, une troisième simulation devait permettre de comparer l'influence du découpage spatial du domaine d'étude dans l'estimation des émissions de polluants. Le périphérique possède des conditions de trafic différentes par rapport au milieu urbain, c'est pourquoi il apparaît intéressant d'étudier un découpage de la métropole de Lyon en 10 réservoirs où le périphérique serait isolé pour constituer un 11^{ème} réservoir. Cette troisième simulation couplée a été préparée sur la base des données 2018. Cependant, la simulation du modèle couplé sur ce dernier découpage n'a pu être finalisée à temps.</p> <p>Pour achever l'analyse, une suite envisagée des travaux présentés consisterait alors à réaliser les calculs du modèle couplé trafic-émissions sur ce nouveau découpage « 10 réservoirs + périphérique » et à en comparer les résultats avec ceux du découpage « 10 réservoirs » obtenus dans la présente étude.</p>
<p>Résumé (anglais)</p>	<p>Air pollution generated by road traffic is a major challenge in terms of public health and the environment. One of the LICIT laboratory's work focuses on traffic management with two objectives: to streamline traffic and reduce emissions of air pollutants at an urban scale. The laboratory has a high-performance MFD traffic model, developed on a large urban scale and based on the multi-reservoir approach. This traffic model has been coupled with the COPERT emissions model developed within the European MAGnUM project.</p> <p>In order to study the relevance of this coupled model for environmental assessment, the coupled traffic-emission model was applied to the metropolis of Lyon, with a spatial division into 10 reservoirs. The traffic model was previously calibrated based on the 2011 data. The results of this model were then provided to the COPERT emission model for estimating pollutant emissions (CO₂ for the environment, NO_x, and PM₁₀ for health) at the city scale. On the other hand, access to more recent and richer data made it possible to study the influence of calibration on the coupled traffic-emissions model. Thus, part of the work consisted in carrying out a second simulation coupled with the 2018 data, then comparing the 2011 and 2018 emission results. These were then compared with 2018 data from ATMO Auvergne Rhône Alpes.</p> <p>The results show that the new 2018 input data, although more informative, does not improve the results of the 2011 simulation. Moreover, the comparison of the simulation results with the ATMO data shows that, as it stands, the coupled traffic-emission model does not allow a satisfactory estimation of the emissions of CO₂, NO_x and PM₁₀ pollutants.</p> <p>Besides, the respective contributions of reservoirs to the global emissions do not follow the trend described by ATMO, with reservoirs having their contribution either higher or lower compared to ATMO measurements.</p> <p>Finally, a third simulation was to compare the influence of the spatial division of the field of study in the estimation of pollutant emissions. The ring road having drastically different traffic conditions compared to the urban environment, it seems interesting to study a division of the Lyon metropolitan area into 10 reservoirs, the ring road being isolated to form the 11th one. This 3rd</p>

	<p>coupled simulation was prepared based on the 2018 data. However, the simulation of the model coupled with this last division could not be finalized in time. To complete the analysis, a planned follow-up of the work presented would consist in carrying out the calculations of the coupled traffic-emissions model on this new "10 reservoirs + peripheral" division and in comparing the results with those of the "10 reservoirs" division obtained in this study.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	<p>Diagramme Fondamental de zone (MFD) – Modélisation de grands réseaux urbains – Simulation du trafic routier – Modélisation couplée – Modèle d'émission de polluants atmosphériques</p>		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	<p>Macroscopic Fundamental Diagramm (MFD) – large urban scale model – traffic road simulation – coupled model – atmospheric pollution emission model</p>		
Termes géo-graphique (français)	<p>Lyon (Rhône, Région) – Zones IRIS – Réseau urbain – Graphe du réseau – Routes – Périphérique</p>		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	94	6	26

“As far as I can see, there is no future for transport system that is based on the private car. This is not to say that all cars must be eliminated. There is a place for the car in a sustainable transportation system, but not as the main supporting beam of the transport system. It can at best only « seal the cracks » in a system built on more sustainable modes of transportation. The volume of transport, and especially road transport, needs to be adapted to a level that is sustainable in the long term. And this will mean the end of the auto industry, as we know it.”

— Lars Henriksson

Professeur de droit à Stockholm School of Economics
Trade Unions in the Green Economy : Working for the Environment

“Nous ne pouvons pas lutter contre l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, la pollution sonore et la fragmentation du paysage causées par les transports sans tenir compte de la progression du trafic qu'il soit routier, ferroviaire, aérien ou maritime. Les progrès technologiques, tels que les moteurs plus propres et plus économes en carburant sont très importants mais ils ne permettront pas à eux seuls de résoudre le problème des émissions liées au transport”

— Professeur Jacqueline McGlade

Directrice exécutive de l'Agence Européenne pour l'environnement, 2007

Table des matières

Travail de fin d'études pour le diplôme d'ingénieur de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État	1
Notice analytique	2
Table des matières	7
Table des figures	10
Table des tableaux	12
Remerciements	13
Glossaire.....	14
Introduction	15
Contexte institutionnel	17
L'IFSTTAR.....	17
L'ENTPE	17
Le laboratoire Ingénierie Circulation Transports (LICIT)	17
Le projet MAGNUM.....	18
Chapitre 1 : Théorie du trafic et modèle d'émission	19
I.1 Le modèle de trafic : simulation MFD dynamique macroscopique du trafic	19
I.1.1 Avantages du modèle dynamique macroscopique pour une grande échelle.....	20
I.1.2 Théorie modèle macroscopique : <i>Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)</i>	20
I.1.3 Théorie du modèle macroscopique : l'approche multi-réservoirs.....	22
I.1.3.1 Théorie du modèle à un réservoir	22
I.1.3.2 Théorie du modèle à deux réservoirs	24
I.1.3.3 Théorie du modèle multi-réservoirs.....	25
I.1.4 La plateforme de simulation MFD du trafic développée par le LICIT.....	27
I.1.4.1 Entrées/sorties du simulateur MFD.....	27
I.1.4.2 Pré-traitement des données d'entrée	28
I.2 Le modèle d'émission de polluants : COPERT V	29
I.2.1 Le choix du modèle d'émission : modèle COPERT	30
I.2.2 Le modèle d'émission européen COPERT version V	30
I.2.3 Principe de fonctionnement de COPERT V	31
I.2.4 Hypothèses d'utilisation de COPERT V dans l'étude.....	32
I.3 Le modèle couplé trafic-émissions.....	32

Chapitre 2. Contexte de l'étude et mise en place de la simulation couplée	35
II.1 Description de la zone d'étude : la zone urbaine de Lyon	35
II.1.1 Le réseau routier de la zone urbaine de Lyon.....	35
II.1.2 Découpage du réseau routier en zones IRIS	37
II.1.3 Découpage en N réservoirs : les deux agrégations étudiées	38
II.2 Préparations des données de la plateforme de simulation MFD du trafic	40
II.2.1 Les paramètres généraux.....	41
II.2.2 Implémentation de l'offre : estimation des MFD 2018 par réservoirs	42
II.2.2.1 MFD 2018 : Données disponibles	43
II.2.2.2 MFD 2018 : hypothèses et méthode	47
II.2.3 Implémentation de la demande et des longueurs de trajet (offre) avec la matrice Origine-Destination.....	52
II.2.3.1 Matrice OD : données disponibles.....	53
II.2.3.2 Matrice OD : hypothèses et méthode	53
II.3 L'estimation des émissions associées	58
II.3.1 Emissions : données disponibles.....	59
II.3.2 Emissions : hypothèses et méthode	62
Chapitre 3 : Résultat des simulations.....	63
III.1 Estimation des MFD : quelle(s) différence(s) ?	63
III.1.1 10 réservoirs : MFD 2011 et MFD 2018	63
III.1.2 MFD 2018 : 10 réservoirs et 10+P réservoirs.....	64
III.2 Résultats de simulation MFD entre 2011 et 2018 (10 réservoirs).....	66
III.2.1 Sortie de la simulation : l'accumulation et la vitesse moyenne dans les réservoirs	66
III.2.2 Distance parcourue par réservoir	69
III.3 Comparaison entre les émissions ATMO et la simulation couplée	71
III.3.1 Méthode de calcul 1 : calcul des émissions avec un parc moyen	72
III.3.1.1 Emissions globale de polluants.....	72
III.3.1.2 Ecart relatif entre les simulations et ATMO	73
III.3.1.3 Contribution de chaque réservoir aux émissions globales	75
III.3.2 Méthode de calcul 2 : calcul des émissions en distinguant les véhicules lourds et les véhicules légers.....	76
III.3.2.1 Emissions globales de polluants	77
III.3.2.2 Ecart relatif entre les simulations et ATMO	78
Discussion.....	80
Références	83

Sitographie	85
Annexes.....	87
Annexe 1 : Comparaison des MFD avec des données 2011 (en gris) et les données 2018 (en rouge) pour 10 réservoirs.	88
Annexe 2 : Comparaison des MFD avec les données 2018 pour 10 réservoirs (en rouge) et 10+P réservoirs (en bleu).....	90
Annexe 3 : Evolution de l'accumulation (en véh) par réservoir pour un découpage en 10 réservoirs à l'année 2011 avec les données du simulateur MFD (en gras noir) et les données empiriques (en gris)	92
Annexe 4 : Evolution de l'accumulation (en véh) par réservoir pour un découpage en 10 réservoirs avec les données du simulateur MFD 2011 (en gris) et les données du simulateur 2018 (en rouge)	93
Annexe 5 : Evolution de la vitesse (en m/s) par réservoir pour un découpage en 10 réservoirs à l'année 2011 avec les données du simulateur MFD (en gras noir) et les données empiriques (en gris)	94

Table des figures

FIGURE 1 : EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE EN FRANCE METROPOLITAINE EN 2017 D'APRES LE CITEPA (LE MONDE, 2019).....	15
FIGURE 2 : GRAPHE DES RUES DE LA PRESQU'ILE LYON AVEC DES LIENS (EN NOIR) ET DES NŒUDS (EN BLEU)	19
FIGURE 3 : DIAGRAMME FONDAMENTAL D'UNE RUE ET SES ZONES DE COMPORTEMENT ROUTIER (C. BUISSON ET J-B. LESSORT, 2010)	21
FIGURE 4 : FLUX AGREGE Q EN FONCTION DE LA CONCENTRATION AGREGE A L'ECHELLE D'UN QUARTIER DE 10KM ² AU JAPON (N. GEROLIMINIS ET C.F. DAGANZO, 2008)	21
FIGURE 5 : LE MODELE A UN RESERVOIR. (A) RESEAU AVEC DES TRAJETS DECRITS A L'ECHELLE DES LIENS (B) AGREGATION A UN RESERVOIR (C) MFD, PRODUCTION EN FONCTION DE L'ACCUMULATION (D) SCHEMA-BLOC DU MODELE (SOURCE : G. MARIOTTE, 2018).....	23
FIGURE 6 : REPRESENTATIONS D'UN MODELE A DEUX RESERVOIRS R1 ET R2 ET LES FLUX INTRA-RESERVOIRS QINXX ET QOUTXX ET INTER-RESERVOIRS QXX (SOURCE : G. MARIOTTE, 2018).....	24
FIGURE 7 : APPROCHE MULTI-RESERVOIRS : (A) DESCRIPTION DU RESEAU URBAIN (B) DECOUPAGE DU RESEAU EN N RESERVOIRS (C) MFD PAR RESERVOIR ET FLUX ENTRE RESERVOIRS (G. MARIOTTE, 2018)	25
FIGURE 8 : ENTREES ET SORTIES DU SIMULATEUR MFD DEVELOPPE PAR LE LICIT, LE DECOUPAGE DU RESEAU -DONNEE 0-EST DONNEE INDIRECTEMENT PAR LES JEUX DE DONNEES NUMEROTES 1, 2, 3 ET 4	27
FIGURE 9 : FONCTIONNEMENT GENERAL DU MODELE DE SIMULATION MFD AVEC LA PHASE DE PRE-TRAITEMENT (G. MARIOTTE, 2018)	28
FIGURE 10 : UTILISATION DES MODELES D'EMISSION EN FONCTION DES MODELES DE TRAFIC	30
FIGURE 11 : COURBES TYPES D'EMISSION DE LA METHODE COPERT IV : NOX ET CO (TOUS TYPES DE VOITURES ESSENCE ET DIESEL). (ANDRE, 2015).....	31
FIGURE 12 : MODELE COUPLE TRAFIC-EMISSION DEVELOPPE PAR LE LICIT.....	32
FIGURE 13 : RESEAU URBAIN DE LA METROPOLE DE LYON : "RESEAU SYMUVIA" (QGIS)	36
FIGURE 14 : CAPTURE D'ECRAN DU FICHIER DECRIVANT LES LIENS DU RESEAU AVEC NOTAMMENT LES INFORMATIONS D'IDENTIFIANT DE LIEN (« ID »), LE NOMBRE DE VOIES (« NUMLANES »), LA LONGUEUR DE LA VOIE (« LENGTH »), LEUR CATEGORIE (« FUNCCLASS »)	36
FIGURE 15 : RESEAU SYMUVIA ET DECOUPAGE DU TERRITOIRE EN ZONES IRIS (QGIS).....	37
FIGURE 16 : DEUX DECOUPAGES ETUDIES DANS L'ETUDE : (A) DECOUPAGE EN 10 RESERVOIRS (B) DECOUPAGE EN 10+P RESERVOIRS (REALISE SUR QGIS).....	39
FIGURE 17 : DONNEES NECESSAIRES POUR PREPARER LES DONNEES D'ENTREE DU SIMULATEUR MFD	41
FIGURE 18 : EXEMPLE DE SORTIE DE L'ALGORITHME DE Y. LEBRECH : MFD 2011 DU RESERVOIR 9 POUR UN DECOUPAGE A 10 RESERVOIRS.	42
FIGURE 19 : LES FLECHES ROUGES DESIGNENT DES BOUCLES DE COMPTAGE POUR VEHICULES MOTORISE DANS UNE RUE (GRAND LYON, 2019)	43
FIGURE 20 : LOCALISATION DES BOUCLES DE COMPTAGE SUR LE RESEAU SYMUVIA (A) EN ROUGE : BOUCLES 2018 (REALISATION PERSONNELLE SUR QGIS) (B) EN BLEU : BOUCLES 2011 (Y. LEBRECH, 2017).....	44
FIGURE 21 : SUPERPOSITION DU RESEAU SYMUVIA (EN ROUGE) ET DES NŒUDS AMONT DES LIENS DU RESEAU FCD (POINTS EN MARRON)	45
FIGURE 22 : EXTRAIT DES FICHIERS « TRACKS » ET « OBSERVATIONS » DU 5 FEVRIER 2018	46
FIGURE 23 : TRAJET D'UN VEHICULE, AVEC LES TEMPS DE PARCOURS ESTIMES	50
FIGURE 24 : STATISTIQUE DE L'ERREUR RELATIVE DANS LE CALCUL DES TEMPS DE PARCOURS POUR LES TRAJETS DU 5 FEVRIER 2018 (PYTHON)	50
FIGURE 25 : CAPTURE D'ECRAN DU TRAVAIL DE SUPERPOSITION DU RESEAU SYMUVIA ET DU RESEAU FCD POUR UNE EQUIVALENCE DU PERIPHERIQUE AU NIVEAU DE LA GARE PERRACHE.	51
FIGURE 26 : EXEMPLE D'UN COUPLE OD ALLANT DU RESERVOIR 1 AU RESERVOIR 4 ET 3 CHEMINS POSSIBLES POUR ARRIVER A DESTINATION.	52
FIGURE 27 : NATURE DES CHEMINS DANS UN RESEAU	52
FIGURE 28 : CAS OU UN CHEMIN EST REPERTORIE COMME AYANT POUR ORIGINE LE RESERVOIR 9 MAIS QUI A UNE SUITE DE LIENS (I.E. UN CHEMIN) QUI DEMARRE DANS DES RESERVOIRS VOISINS (ZONES ENTOUREES EN POINTILLES ROUGES)	54
FIGURE 29 : LIENS ENTRE DEUX ZONES IRIS (EN ORANGE ET EN BLEU) : CERTAINS SONT ENTRE DEUX RESERVOIRS ET D'AUTRES SONT INTEGRALEMENT INCLUS DANS UN RESERVOIR	54
FIGURE 30 : LIEN QUI PASSE PAR 3 RESERVOIRS EN TRAVERSANT LE RESERVOIR 8.	55
FIGURE 31 : EXEMPLE D'UN CHEMIN PASSANT PAR LE PERIPHERIQUE ET SORTANT REGULIEREMENT DE CELUI-CI	56
FIGURE 32 : LONGUEUR DE CHEMIN ENTRE DEUX PORTIONS DE PERIPHERIQUE	56
FIGURE 33 : LES DONNEES UTILISEES POUR L'ESTIMATION DES EMISSIONS DE POLLUANTS ET COMPARAISON	59
FIGURE 34 : CARTE DU RESEAU ATMO OU SONT EVALUEES LES EMISSIONS DE POLLUANTS SUR LA ZONE URBAINE DE LYON.....	60
FIGURE 35 : COURBE D'EMISSION DE COPERT V POUR LES VP, VUL, BUS, PL ET UN PARC MOYEN POUR (A) LE CO ₂ ; (B) LES NOX ; (C) LE PM10.....	61
FIGURE 36 : RESEAU SYMUVIA EN ROUGE ET RESEAU ATMO EN VERT : (A) LE RESEAU ATMO SELECTIONNE POUR L'ETUDE ; (B) RESEAU ATMO INITIAL	62
FIGURE 37 : COMPARAISON DES MFD 2011 (EN GRIS) ET MFD 2018 (EN ROUGE) AVEC DEUX CAS DE FIGURE : (A) LE MFD 2018 EST AU DESSUS DU MFD 2011 (B) LE MFD 2018 EST EN DESSOUS DU MFD 2011.....	64

FIGURE 38 : COMPARAISON ENTRE LES MFD 2018 D'UN DECOUPAGE EN 10 ET D'UN 10+P RESERVOIRS AVEC (A) LE MFD DU PERIPHERIQUE TOUT SEUL ; (B) LE MFD 10 RESERVOIRS EST AU DESSUS DU MFD 10+P RESERVOIRS ; (C) ET (D) LE MFD 10 RESERVOIRS EST CONFONDU AVEC LE MFD 10+P RESERVOIRS.....	65
FIGURE 39 : EVOLUTION DE L'ACCUMULATION (EN VEH) PAR RESERVOIR AU COURS DE LA JOURNEE POUR UN DECOUPAGE EN 10 RESERVOIRS A L'ANNEE 2018 AVEC LES DONNEES DE LA SIMULATION 2018 (EN GRAS) ET DES DONNEES EMPIRIQUES 2018 (EN GRIS)	66
FIGURE 40 : EVOLUTION DE L'ACCUMULATION (EN VEH) PAR RESERVOIR AU COURS DE LA JOURNEE POUR UN DECOUPAGE EN 10 RESERVOIRS : COURBES DES RESERVOIRS 2, 9 ET 4 POUR LA SIMULATION 2011 (EN GRIS) ET LA SIMULATION 2018 (EN ROUGE)	67
FIGURE 41 : EVOLUTION DE LA VITESSE MOYENNE (EN M/S) PAR RESERVOIR AU COURS D'UNE JOURNEE POUR LA SIMULATION 2011 (GRAS NOIR), LA SIMULATION 2018 (GRAS ROUGE) ET LES DONNEES EMPIRIQUES DE 2018 (EN GRIS)	68
FIGURE 42 : COURBE DES DISTANCES TOTALES PAR RESERVOIR ET PAR HEURE POUR LA SIMULATION (A) 2011, (B) 2018	69
FIGURE 43 : ECART RELATIF ENTRE LA DISTANCE PARCOURUE DANS UN RESERVOIR EN SIMULATION 2018 PAR RAPPORT A CELLE EN SIMULATION 2011	70
FIGURE 44 : EVOLUTION DU COEFFICIENT D'EMISSION HORAIRE POUR LES CINQ JOURS ENTRE LE 5 ET LE 9 FEVRIER 2018 (EN GRIS) ET LA MOYENNE HORAIRE OBTENUE SUR LES CINQ JOURS (EN ORANGE).....	71
FIGURE 45 : EMISSIONS DE POLLUANTS SUR TOUT LE TERRITOIRE D'ETUDE POUR ATMO ET LES 2 SIMULATIONS 2011 ET 2018 POUR (A) LES PM10, (B) LES NOX, (C) LE CO2	72
FIGURE 46 : ECART RELATIF DES EMISSIONS DE POLLUANTS PAR RESERVOIR ENTRE LA SIMULATION 2011 ET ATMO POUR (A) LES NOX (B) LE CO2 (C) ET LES PM10 ENTRE LA SIMULATION 2018 ET ATMO POUR (D) LES NOX (E) LE CO2 (F) ET LES PM10	73
FIGURE 47 : EMISSIONS DE CO2 D'ATMO ET EN SIMULATION 2018 ET 2011 (A) DANS LE RESERVOIR 9 : EN SIMULATION 2018 LES EMISSIONS SONT SURESTIMEES (B) DANS LE RESERVOIR 1 : EN SIMULATION 2018 LES EMISSIONS LES PLUS SOUS-ESTIMEES DE TOUS LES RESERVOIRS	74
FIGURE 48 : CONTRIBUTION DES RESERVOIRS AUX EMISSIONS HORAIRE GLOBALES DE PM10 (A) POUR LA SIMULATION 2011 ; (B) POUR LA SIMULATION 2018 EN COMPARAISON AVEC LES EMISSIONS ATMO.....	75
FIGURE 49 : EMISSIONS GLOBALES DE POLLUANTS POUR LES SIMULATIONS 2011 (EN BLEU) ET 2018 (EN ROUGE) AVEC LES METHODES DE CALCUL « M1 » (TRAITS PLEINS) ET « M2 » (TRAITS POINTILLES). (A) EMISSIONS DE NOX ; (B) EMISSIONS DE PM10 ; (C) EMISSIONS DE CO2.....	77
FIGURE 50 : ECARTS RELATIFS DES EMISSIONS GLOBALES DE POLLUANTS ENTRE LES DEUX METHODES DE CALCUL D'EMISSIONS M1 ET M2 POUR LA SIMULATION 2011 (EN BLEU) ET LA SIMULATION 2018 (EN ROUGE) POUR LES EMISSIONS DE (A) NOX ; (B) PM10 ; (C) CO2.....	78
FIGURE 51 : SCHEMA DE LA PRODUCTION FAITE AU COURS DE L'ETUDE	80

Table des tableaux

TABLEAU 1 : TABLEAU DE COMPARAISON DES MODELES *ACCUMULATION-BASED* ET *TRIP-BASED* 25

Remerciements

Je tenais à remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mon stage de fin d'étude, et qui ont fait de ces 5 mois une expérience autant enrichissante qu'agréable.

Tout d'abord, je voudrais remercier tout particulièrement Delphine Lejri, chercheuse au sein du LICIT pour avoir supervisé ce stage au cours de ces 5 mois. Je la remercie notamment pour toute son attention et sa disponibilité sans faille pendant la mise en œuvre de mes travaux de recherche. Cette expérience s'est avérée également enrichissante pour les collaborations que j'ai pu avoir avec les autres chercheurs du laboratoire sur des questions scientifiques en lien avec les travaux de recherche en Transports.

Je tiens ensuite à remercier Guilhem Mariotte pour ses précieux conseils, sa large connaissance technique et pour toutes les discussions que j'ai eu grand plaisir à avoir avec lui. Merci également à Jean Krug, véritable caverne d'Alibaba, que je suis venue embêter régulièrement avec mes questions sur les bases de données. Je voudrais remercier Emmanuel Leger pour son expertise toujours pointue et précise et pour son engagement dans le travail qu'il réalise au sein de la Task Force. Merci à Manon Seppecher pour la collaboration qu'on a eue sur le travail des indomptables données de *Floating Car Data*. Enfin, je remercie l'ensemble des membres de l'équipe de recherche pour leur dynamisme volontaire et leur bonne humeur au LICIT et aux pauses café, ce qui a permis un climat de travail apaisant et enthousiaste.

Last but not least, je souhaite remercier très sincèrement ma famille qui m'a soutenue à distance, et Dominique, ma maman, pour sa relecture attentive du rapport. Enfin, je réserve une pensée particulière à Guillaume pour son soutien tant moral que scientifique et qui m'a encouragée et accompagnée tout au long de la réalisation de ces travaux de recherche.

Glossaire

AEE : Agence Européenne pour l'Environnement

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique

CO₂ : Dioxyde de carbone

COV : Composés Organiques Volatils

COPERT : *Computer Program to calculate Emissions from Road Transport* (Programme informatique pour calculer les émissions induites par le transport routier)

EMD : Enquête Ménage-Déplacement

ENTPE : Ecole de l'aménagement durable des territoires (anciennement Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat)

ERC : *European Research Council* (Conseil Européen de la Recherche)

FCD : *Floating Car Data* (Données de véhicules traçeurs)

GES : Gaz à Effet de Serre

IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

INSEE : Institut National de la Statistique et des Études Economiques

LICIT : Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports

MAGnUM : *Multiscale and Multimodal Traffic Modelling Approach for Sustainable Management of Urban Mobility* (modélisation dynamique de l'ensemble du trafic pour une gestion durable de la mobilité urbaine aux niveaux multimodal et multi-échelles)

MFD : *Macroscopic Fundamental Diagram* (Diagramme fondamental macroscopique)

NO_x : Oxyde d'azote

OD (matrice) : Origine-Destination

OMS : Organisation Mondiale pour la Santé

Phem : Passenger car and Heavy duty Emission Model

PL : Poids lourd

PM₁₀, PM_{2,5} : Particules en suspension de diamètre inférieur à 10 µm (respectivement 2,5µm)

VP : Voiture particulière

VUL : Véhicule utilitaire léger

Introduction

L'utilisation de la voiture individuelle connaît un succès fulgurant depuis les années 1950 avec la démocratisation de l'automobile, synonyme de liberté et d'indépendance. En France, ce sont plus de 32 millions de véhicules particuliers immatriculés qui circulent sur le territoire en 2017, soit 83% du parc automobile (INSEE, 2018). En parallèle le territoire se façonne pour permettre aux véhicules de mieux circuler et les aires urbaines s'articulent autour des axes routiers. La construction des nouvelles routes attire toujours plus de voitures et l'accroissement de la population en ville entraîne une demande en déplacement d'autant plus forte. Ces tendances ne sont pas sans conséquences et s'accompagnent de problèmes de congestion accrue qui constituent un frein majeur à la mobilité et de problèmes de pollution de l'air par les gaz et les particules.

La pollution atmosphérique est au carrefour de nombreux enjeux de santé publique et d'environnement. Elle constitue un enjeu sanitaire de taille puisque la pollution est à l'origine de nombreuses maladies, de décès prématurés, ainsi qu'un enjeu environnemental car elle participe au phénomène de réchauffement climatique, où certains gaz comme le CO₂ contribuent à l'accroissement de l'effet de serre. En France, le transport routier est le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre (GES) et l'une des principales sources d'émission de particules provenant des gaz, de l'usure des plaquettes de frein et des frottements des routes et des pneus. Plus les particules sont fines, plus elles pénètrent en profondeur dans les voies respiratoires, le sang, puis les organes. D'après les données du CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique), au cours de l'année 2017, le transport routier était responsable de 29,7% des émissions de GES dont la moitié est imputée aux voitures particulières (Le Monde, 2019) (voir **Figures 1a** et **1b**). De plus, ce même transport routier est responsable de 14% des émissions de particules fines (CITEPA, 2017). L'impact de la pollution atmosphérique par le trafic routier sur la dégradation de la santé humaine et de l'environnement en fait un sujet de préoccupation majeur de santé publique et de lutte contre le réchauffement climatique.

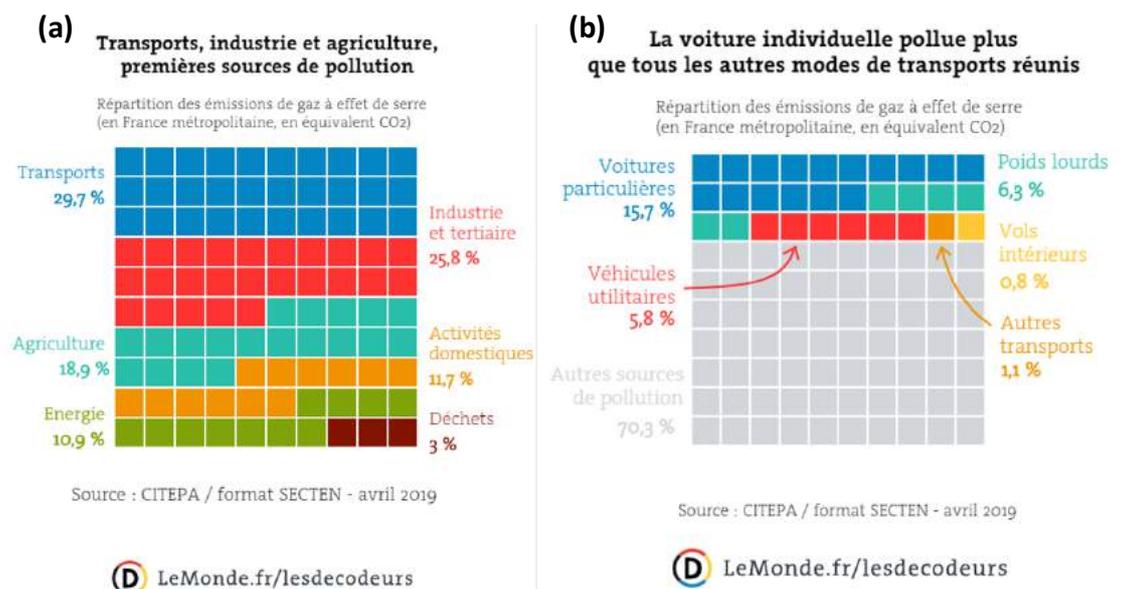


Figure 1 : Emissions de gaz à effet de serre en France métropolitaine en 2017 d'après le CITEPA (Le Monde, 2019)

C'est pourquoi, afin d'agir en faveur d'une meilleure qualité de l'air et dans l'optique de favoriser une baisse de la quantité des particules et des gaz, des seuils d'exposition aux polluants atmosphériques ont été fixés. C'est ainsi que, par exemple, l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS) a établi des valeurs de concentration recommandées de chacun des polluants (OMS, 2018). A l'échelle européenne, la réglementation de la qualité de l'air impose aux états membres d'évaluer la qualité de l'air en utilisant des méthodes de mesure ou des approches de modélisation (AEE, 2016). Les zones de gestion et d'évaluation se situent généralement dans les grandes villes avec notamment l'objectif de développer des plans locaux et régionaux permettant de combattre la pollution de l'air dans les villes et de proposer des scénarios d'aménagement.

Les besoins de mobilité sont bien présents, et les nombreux enjeux économiques, sociaux et environnementaux impliquent une gestion et un suivi du trafic optimisés. Une solution privilégiée est d'agir sur la source des émissions en intervenant sur le trafic. Dans ce contexte, les gestionnaires des infrastructures de transport envisagent des mesures de gestion du trafic à deux objectifs : fluidifier le trafic mais également réduire les émissions de polluants atmosphériques. Simuler différents scénarios d'aménagement se révèle alors nécessaire, ce qui est rendu possible par les modèles de simulation couplés trafic-émissions.

Ainsi, des laboratoires de recherche comme le LICIT (Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports), élaborent des modèles de simulation dynamique du flux du trafic routier et s'intéressent également à associer ces derniers avec des modèles d'émission de polluants associés.

Pour réaliser un modèle couplé trafic-émissions, il faut dans un premier temps disposer d'un modèle de trafic performant. Le LICIT a développé différentes plateformes de simulation prédisant au mieux les états de trafic à l'échelle d'un large réseau urbain, telle que la métropole de Lyon. Pour ce faire, plusieurs échelles de modélisation sont disponibles, du local au global. Le trafic peut ainsi être modélisé à l'échelle microscopique avec la plateforme SymuVia ou à l'échelle macroscopique à l'aide d'approches de simulation plus agrégées développées à travers le projet européen MAGnUM (*Multiscale and Multimodal Traffic Modelling Approach for Sustainable of Urban Mobility*) du LICIT. Ces simulations de trafic peuvent ensuite être couplées au modèle d'émission européen COPERT (*COmputer Program to calculate Emissions from Road Transport*), destiné à fournir des informations sur l'évolution de la pollution routière à travers des évaluations environnementales.

Cette étude s'intéresse à la pertinence d'une approche agrégée de modélisation du trafic à l'échelle de la métropole de Lyon pour l'évaluation de l'impact environnemental des déplacements routiers. En effet, à cette large échelle, les temps de simulation considérables sont un frein à l'utilisation d'une approche de modélisation microscopique. Elle abordera en particulier les questions de la sensibilité au découpage spatial et au calibrage avec des données de 2011 et 2018.

Le travail s'articulera en trois parties. La première partie traitera de la théorie fondamentale en trafic et en émission qui permettent de mettre en place un modèle couplé trafic-émission. La seconde partie présente le contexte spatial et temporel de l'étude avec notamment l'étude de deux découpages spatiaux. Cette partie décrira l'ensemble des données utilisées pour le calibrage du modèle et les hypothèses nécessaires pour la mise en place du modèle couplé. Enfin, la troisième partie expose les résultats de la simulation et tentera de comparer l'influence du calibrage pour modéliser les polluants.

Contexte institutionnel

Le travail présenté dans ce document fait partie du projet MAGnUM, projet européen du Conseil Européen de la Recherche (ERC). Les recherches autour de ce projet sont conduites par des chercheurs du laboratoire du LICIT, unité mixte de recherche de l'IFSTTAR et de l'ENTPE.

L'IFSTTAR

L'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux), est un établissement public à caractère scientifique et technologique, placé sous la tutelle de deux ministères : le Ministère de la Transition écologique et solidaire et le Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. L'établissement est implanté à Bron.

L'institut conduit des travaux de recherche, d'expertise et d'innovation dans les domaines du génie urbain, du génie civil et des matériaux de construction, des risques naturels, de la mobilité des personnes et des biens, des systèmes et des moyens de transports et de leur sécurité, des infrastructures, de leurs usages et de leurs impacts. Ces travaux sont abordés sous différents aspects (technique, économique, social, sanitaire, énergétique, environnemental et humain) et sont réalisés dans le but d'améliorer les conditions de vie et de favoriser un développement durable des sociétés.

L'ENTPE

L'ENTPE ou Ecole de l'aménagement durable des territoires (anciennement Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat) est une école d'ingénieurs placée sous la tutelle du Ministère de la transition écologique et solidaire. Elle forme aux métiers de l'aménagement des territoires et possède 7 formations spécialisées axées autour du génie-civil et du bâtiment, du transport et enfin de l'urbanisme et l'environnement.

L'école se compose de 710 étudiants en cycle ingénieurs, de 6 laboratoires et de 104 doctorants (ENTPE, 2019).

Le laboratoire Ingénierie Circulation Transports (LICIT)

Créé en 1993, le LICIT est une unité mixte de recherche commune à l'IFSTTAR à Bron et à l'école d'ingénieurs ENTPE à Vaulx-en-Velin (Ecole de l'aménagement durable des territoires). Ce laboratoire mène des recherches sur les thématiques de mobilité des personnes. Il s'intéresse à la modélisation dynamique et la régulation des flux de trafic routier, intégrant les différents modes de transports qui utilisent la route (ENTPE, 2019).

Le LICIT est composé de 11 chercheurs, 5 ingénieurs techniciens administratifs et de 8 doctorants.

Le laboratoire a de nombreuses autres thématiques de recherche transversale. Il s'implique ainsi dans la réalisation d'un couplage de ses modèles de trafic avec les modèles environnementaux d'émission de polluants et de bruits. L'objectif est ensuite d'élaborer des stratégies de régulation en prenant en compte plusieurs critères : l'intérêt du couplage est alors d'intégrer dans les critères une composante environnementale en évaluant les impacts environnementaux. Le laboratoire étudie également les applications de recueils de données dans le contexte du Big Data et de l'Open Data et développe des outils innovants pour la mobilité multimodale, intelligente et coopérative.

Enfin, l'ensemble des recherches menées au LICIT a pour but d'aboutir à un outil d'aide à la décision pour les autorités organisatrices de la mobilité, les opérateurs de transport public et les politiques publiques pour la gestion durable du trafic.

Le projet MAGnUM

Le travail présenté dans ce document s'inscrit dans le cadre du projet MAGnUM¹ (*Multiscale and Multimodal Traffic Modelling Approach for Sustainable of Urban Mobility*). Ce projet est piloté par Ludovic Leclercq, chercheur du LICIT, et est portée par l'ERC².

Initié en 2015 pour une durée de 5 ans, le projet MAGnUM porte sur la modélisation dynamique de l'ensemble du trafic pour une gestion durable de la mobilité urbaine au niveau multimodal et multi-échelles.

Son principal objectif est de réaliser un modèle dynamique des déplacements au plus proche des conditions de circulation réelles dans un réseau urbain en visant un temps de calcul de l'ordre du temps réel. Il permettra de répondre à des questions d'équilibres multimodaux et d'affectation du réseau visant à élaborer des stratégies de régulations innovantes.

¹ le projet MAGnUM : <https://magnum-erc.weebly.com/>

² l'ERC : <https://erc.europa.eu/>

Chapitre 1

Théorie du trafic et modèle d'émission

Le LICIT dispose aujourd'hui de différentes plateformes permettant de caractériser les conditions de trafic sur un large réseau urbain, comme la métropole de Lyon. L'approche peut se faire à différentes échelles : microscopique ou macroscopique. Nous allons voir dans ce chapitre quels sont les modèles de simulation retenus pour répondre aux besoins de gestion de trafic et d'estimation d'émissions de polluants. Les méthodes d'évaluation doivent répondre à un cahier des charges : elles se doivent d'être fiables et réalisées à un coût réduit. Ce coût de simulation est principalement lié au temps de calcul et aux besoins en données.

I.1 Le modèle de trafic : simulation MFD dynamique macroscopique du trafic

La modélisation du trafic permet de fournir une représentation simplifiée du trafic routier, elle offre une meilleure compréhension de ses mécanismes et des facteurs qui influencent son évolution.

On distingue deux classes de modèles de trafic :

- les **modèles d'affectation statiques de trafic** : ils décrivent les états de trafic à l'échelle de la rue d'un réseau urbain, mais ne sont pas pertinents pour les évaluations environnementales parce qu'ils ne rendent pas compte des phénomènes d'écoulement dans les rues avec notamment la création et la présence des congestions.
- les **modèles dynamiques d'écoulement** : ils décrivent la dynamique au sein de la rue et détaillent ainsi les phénomènes de congestion en identifiant leur durée, leur apparition, leur dissipation et leur propagation.

Le modèle de simulation dynamique développé par le LICIT, appelé le « Simulateur MFD », s'appuie sur des modèles de représentation de trafic où le réseau urbain est représenté par un graphe composé de liens et de nœuds (les liens représentent des axes routiers tandis que les nœuds correspondent aux intersections entre les routes comme l'illustre la **Figure 2**). Dans cette partie est détaillé le fonctionnement des outils théoriques utilisés par le laboratoire et qui lui permettent de simuler le trafic à grande échelle.



Figure 2 : Graphe des rues de la presqu'île Lyon avec des liens (en noir) et des nœuds (en bleu)

I.1.1 Avantages du modèle dynamique macroscopique pour une grande échelle

Le choix d'un modèle de trafic repose sur la sélection de l'échelle de modélisation avec deux grands types de modèles : les modèles microscopiques et les modèles macroscopiques

Les **modèles microscopiques** de trafic représentent le comportement du trafic à l'échelle de l'individu. Ils intègrent les spécificités d'un trafic urbain comme la gestion des intersections ou les affectations de voies et décrivent de manière détaillée le comportement des véhicules. Ils sont particulièrement pertinents pour pouvoir comparer des scénarios d'aménagement à l'échelle d'une rue. Les résultats obtenus sont performants mais les modèles nécessitent de nombreux paramètres d'entrée avec par exemple le détail individualisé des origines et destinations de chaque véhicule simulé ainsi que le détail de son itinéraire microscopique sur le réseau. Le modèle a ses limites, il est fortement sensible aux calibrages des paramètres d'entrée, mais il est pertinent pour évaluer la congestion et les émissions de polluants. Cependant, à l'échelle d'un large réseau de la taille de Lyon, les temps de calculs ainsi que la taille des données et leur préparation sont conséquents. Il semble donc pertinent de pouvoir disposer d'une simulation plus légère et plus rapide en temps d'exécution de pouvoir tester un certain nombre de scénarios. On envisage alors une approche plus agrégée et plus rapide.

A l'inverse, les **modèles macroscopiques** représentent le trafic comme un flux continu à l'échelle d'un réseau agrégé ; ce type de modèle repose sur l'analogie avec l'écoulement d'un fluide. Les états de trafic générés par ces modèles offrent des résultats satisfaisants avec un nombre moindre de paramètres d'entrée et donc une facilité de calibrage. Il est ainsi apparu pertinent de développer le modèle de trafic à l'échelle agrégée.

L'approche macroscopique s'appuie sur l'utilisation du diagramme fondamental macroscopique et d'une approche multi-réservoirs du réseau qui sont décrites dans les sous-parties suivantes.

I.1.2 Théorie modèle macroscopique : *Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)*

De nombreuses approches permettant de modéliser les états de trafic ont été proposées durant ces dernières décennies.

MFD (flux en fonction de la concentration) :

Il est possible de décrire les états de trafic d'une rue (ou lien) en réalisant son Diagramme Fondamental. Ce dernier met en relation les variables du flux (véh/s) ou débit et de la densité du trafic (véh/m) ou concentration comme l'illustre la **Figure 3** ci-dessous. Le diagramme se présente comme une courbe de forme triangulaire sur laquelle on peut constater deux états de trafic : la partie gauche indique un régime fluide et la partie droite illustre le régime congestionné. En effet, si la concentration est faible, c'est-à-dire qu'il y a peu de véhicules qui circulent sur le réseau, alors le trafic est fluide. A contrario, au-delà d'un seuil de concentration critique, la congestion apparaît se traduisant par une baisse du flux.

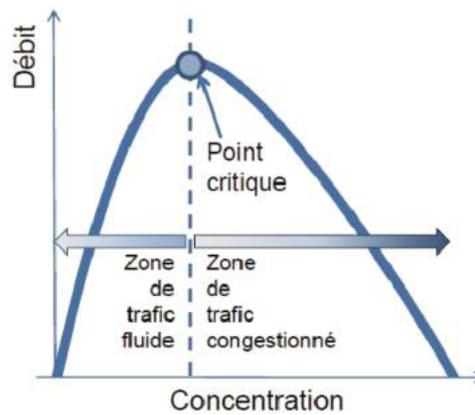


Figure 3 : Diagramme Fondamental d'une rue et ses zones de comportement routier (C. Buisson et J-B. Lessort, 2010)

Plutôt que de modéliser le trafic à l'échelle d'un lien, on le modélise à l'échelle d'une zone, composé d'un ensemble de liens. Le principe est le même qu'à l'échelle d'un lien et les états de trafics sont alors caractérisés par un Diagramme Fondamental Macroscopique (ou MFD, *Macroscopic Fundamental Diagram*). L'idée du MFD est ancienne et date de 1969 avec les travaux de J.W. Godfrey (Godfrey, 1969). Mais ce n'est qu'en 2008 dans l'étude sur un réseau de 10 km² dans la ville de Yokohama au Japon (N. Geroliminis, C.F. Daganzo, 2008) que l'existence du MFD a été vérifiée. Le MFD prend alors la forme triangulaire d'un Diagramme Fondamental comme l'illustre la **Figure 4**. Dans cet exemple, le MFD d'un réseau trace le flux agrégé q dans une zone (en véh/s) en fonction de la concentration agrégée k dans une zone (en véh/m).

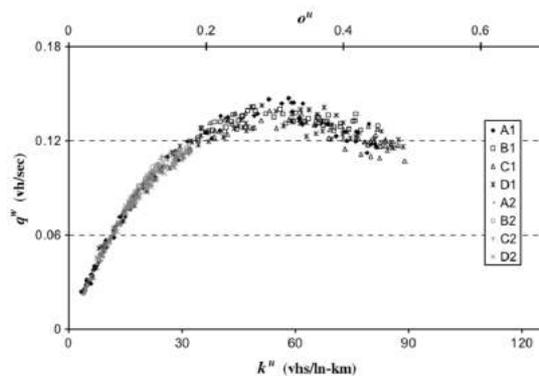


Figure 4 : Flux agrégé q en fonction de la concentration agrégée à l'échelle d'un quartier de 10km² au Japon (N. Geroliminis et C.F. Daganzo, 2008)

Au cours des dernières décennies, de multiples travaux ont alimenté les connaissances sur le MFD, précisant ainsi son domaine de définition. Des études ont démontré que la forme du MFD dépendait de d'hypothèses telles que :

- la forme du réseau et les types de routes présentes (autoroutes, zones urbaines, etc.) (L. Knoop, Victor, D. De Jong et P. Hoogendoorn, 2014)
- l'heure de la journée sur laquelle est estimé le MFD : en effet, la forme du MFD est plus basse lorsqu'elle est mesurée à un moment de la journée où les congestions se résorbent contrairement au moment où elles débutent (C. Buisson et C. Ladier, 2009) (V. Gayah et C. F. Daganzo, 2011) (N. Geroliminis et J. Sun, 2011)
- l'homogénéité de la distribution du trafic dans l'espace et dans le temps (N. Geroliminis et J. Sun, 2011).

MFD (production en fonction de l'accumulation) :

Plusieurs définitions du MFD existent, dépendant des variables impliquées.

Ainsi, une autre définition du MFD consiste à tracer la production P (en véh.m/s) en fonction de l'accumulation n (en véh). Les valeurs de production et d'accumulation vérifient la relation suivante :

$$Vitesse = \frac{Production}{Accumulation}$$

où $Vitesse$ est la vitesse moyenne des véhicules sur la zone.

D'une part, les valeurs de production peuvent être calculées à partir de données de comptage qui estiment le nombre de véhicules passant à un endroit donné d'une route. D'autre part, les valeurs d'accumulation se déduisent en calculant $Accumulation = \frac{Production}{Vitesse}$ où les valeurs de vitesse moyenne dans une zone sont déduites de données GPS

Conclusion

Ainsi, le MFD se révèle être un puissant outil pour décrire les états de trafic à l'échelle d'un réseau urbain sans trop de difficulté de mise en œuvre dans l'optique d'étudier les caractéristiques d'un réseau et de la gestion du trafic.

Le MFD est utilisé dans l'approche multi-réservoirs, décrite dans la partie suivante.

1.1.3 Théorie du modèle macroscopique : l'approche multi-réservoirs

L'approche multi-réservoirs consiste à partitionner le réseau en plusieurs zones appelées « réservoirs ». Dans chacun de ces réservoirs, le trafic est considéré comme homogène et un MFD décrit les états de trafic. Cette approche permet de modéliser les flux de trafic entre les réservoirs. Le principe est décrit dans (G. Mariotte, 2018) et est résumé ci-dessous.

1.1.3.1 Théorie du modèle à un réservoir

Un réservoir seul correspond à une partie d'un réseau urbain où circule un ensemble de véhicules (voir **Figure 5.a**). Dans ce réservoir, les états de trafic sont décrits par son MFD.

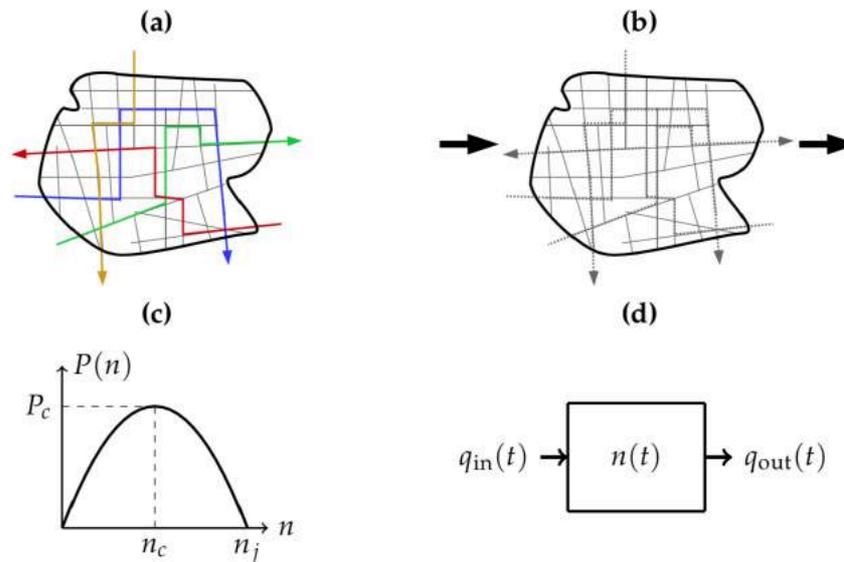


Figure 5 : Le modèle à un réservoir. (a) Réseau avec des trajets décrits à l'échelle des liens (b) Agrégation à un réservoir (c) MFD, production en fonction de l'accumulation (d) Schéma-bloc du modèle (Source : G. Mariotte, 2018)

Le MFD du réservoir est obtenu en traçant la production P (en véh.m/s) en fonction de l'accumulation n (en véh), où l'accumulation correspond au nombre de véhicules circulant dans le réservoir (Figure 5.c). La distance de parcours au sein du réservoir est considérée identique pour tous les usagers, elle correspond à une distance moyenne parcourue L .

Le réservoir étant une partie d'un réseau, les véhicules y transitent et il y a alors des véhicules entrants et sortants (Figure 5.b). L'ensemble des nœuds où les usagers entrent dans le réservoir correspond à l'entrée du réservoir ; à un instant t , il y circule un flux de véhicules entrants $q_{in}(t)$. De même, on considère pour la sortie du réservoir un flux sortant $q_{out}(t)$ à un instant t . Enfin, l'accumulation n est considérée comme étant la variable d'état du système (Figure 5.d) et elle vérifie l'équation de conservation des flux suivante :

$$\frac{dn}{dt} = q_{in}(t) - q_{out}(t)$$

I.1.3.2 Théorie du modèle à deux réservoirs

Dans la plupart des modèles à deux réservoirs, la ville est représentée sous forme de son centre et de sa périphérie, ces deux zones étant figurées par deux aires distinctes sur la **Figure 6** ci-dessous).

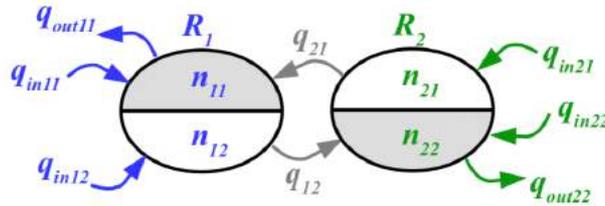


Figure 6 : Représentations d'un modèle à deux réservoirs R_1 et R_2 et les flux intra-réservoirs q_{inXX} et q_{outXX} et inter-réservoirs q_{XX} (Source : G. Mariotte, 2018)

Si on se positionne du point de vue du réservoir R_1 , on peut caractériser plusieurs flux (en bleu sur la **Figure 6**) :

- un flux entrant de véhicules à l'instant t , qui se décompose en une partie qui va rester dans le réservoir R_1 ($q_{in11}(t)$) et une partie qui va dans le réservoir R_2 ($q_{in12}(t)$) ;
- un flux sortant de véhicules à l'instant t $q_{out11}(t)$.

Ces différents flux appelés flux endogènes. Cela vaut également pour le réservoir R_2 (en vert sur la **Figure 6**). On définit également, à l'instant t , des flux de véhicules entre les deux réservoirs notés $q_{12}(t)$ (de R_1 à R_2) et $q_{21}(t)$ (de R_2 à R_1) : ces flux sont qualifiés d'exogènes.

Pour n_{ij} , nombre de véhicules qui se trouvent dans le réservoir R_i à l'instant t et qui vont dans le réservoir R_j , on définit le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn_{11}}{dt} = q_{in11}(t) + q_{21}(t) - q_{out11}(t) \\ \frac{dn_{12}}{dt} = q_{in12}(t) - q_{12}(t) \\ \frac{dn_{22}}{dt} = q_{in22}(t) + q_{21}(t) - q_{out22}(t) \\ \frac{dn_{21}}{dt} = q_{in21}(t) - q_{12}(t) \end{array} \right.$$

En supposant que les longueurs de parcours dans chaque réservoir sont identiques pour tous les usagers, alors il existe un MFD bien défini sur chaque réservoir.

Le modèle à 2 réservoirs est ainsi caractérisé par un MFD par réservoir et des flux entre les 2 réservoirs.

1.1.3.3 Théorie du modèle multi-réservoirs

Le modèle à 2 réservoirs peut être généralisé pour un nombre N de réservoirs ($N > 2$). Il existe actuellement trois approches possédant des niveaux d'agrégation plus ou moins fins et un niveau de détail plus ou moins accru de la dynamique du trafic.

Celui utilisé dans la présente étude se base sur le modèle le moins agrégé et le plus détaillé. Il s'agit du modèle proposé par (Yildirmoglu et Geroliminis, 2014). Dans ce modèle, l'accumulation est décomposée par couple origine-destination (OD) et par route empruntée (où la route est décrite comme une succession de réservoirs). La longueur de parcours est également décomposée par réservoir et peut varier en fonction du temps.

L'approche multi-réservoirs peut être illustrée par la **Figure 7** ci-dessous.

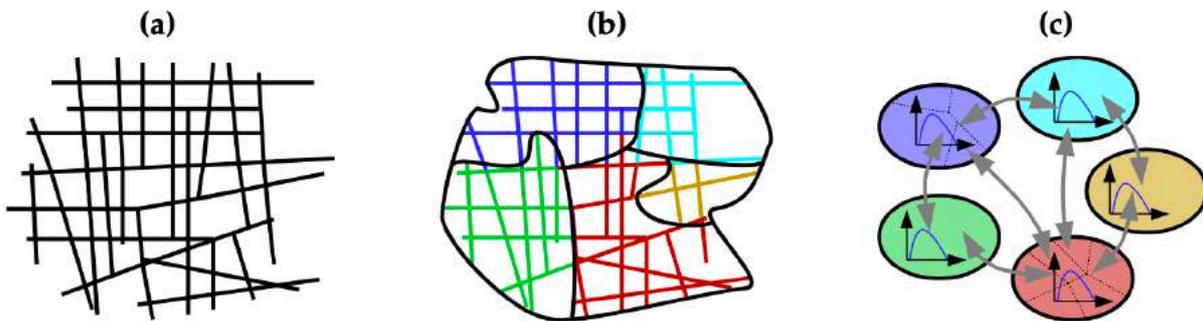


Figure 7 : Approche multi-réservoirs : (a) description du réseau urbain (b) découpage du réseau en N réservoirs (c) MFD par réservoir et flux entre réservoirs (G. Mariotte, 2018)

Enfin, il est possible de modéliser le trafic avec deux approches : *trip-based* ou *accumulation-based*. Le premier modèle s'appuie sur une description des trajets dans les réservoirs tandis que l'*accumulation-based* s'appuie sur une description de l'accumulation. Plusieurs différences existent entre ces deux approches, elles sont résumées dans le **Tableau 1** ci-dessous.

	Modèle <i>accumulation-based</i> (Modèle choisi pour la simulation)	Modèle <i>trip-based</i>
Flux de sortie	Sortie proportionnelle à la production dans le réservoir	Implicitement décrit
Représentation de la dynamique du trafic	Trafic comme un flux continu	Trafic qui identifie les trajets de chaque véhicule
Complexité	Complexité de l'ordre du nombre de pas de temps	Complexité proportionnelle au nombre de véhicules en déplacement
Stabilité	Stable tant que le pas de temps n'excède pas le temps de parcours minimum d'un véhicule en libre circulation	Instabilités dues au fait qu'un véhicule ne peut pas être divisé : des erreurs numériques se glissent dans les résultats.

Tableau 1 : Tableau de comparaison des modèles *accumulation-based* et *trip-based*

La différence fondamentale entre les deux modèles est la définition du flux de sortie :

- Dans le modèle *accumulation-based*, le flux de sortie est proportionnel au flux circulant dans le réservoir (et donc proportionnel à la production).
- Dans le modèle le *trip-based*, le flux est implicitement décrit : le principe consiste à faire circuler les véhicules dans le réseau à une même vitesse moyenne, la vitesse est mise à jour et les véhicules sortent du système une fois qu'ils ont parcouru la longueur de parcours qui leur a été attribuée¹ : on a alors le flux de sortie.

D'autres différences sont notables entre les deux modèles. Ainsi, par exemple, le modèle *accumulation-based* modélise le trafic comme un flux continu de véhicules et il est possible d'avoir des résultats avec des fractions de véhicules (par exemple, on peut avoir un flux de 1,6 véhicules) tandis que le modèle *trip-based* considère chaque trajet et aucun véhicule ne peut alors être divisé. Une autre différence repose sur leur complexité. Le modèle *accumulation-based* a une complexité proportionnelle au nombre de pas de temps : pour une même durée de simulation, plus le pas de temps est grand, plus la complexité diminue. Au contraire, le modèle *trip-based* a une complexité proportionnelle au nombre de véhicules en déplacement, qui augmente donc avec les phénomènes de congestion et qui est amplifiée par la taille du réseau étudié.

Pour ces raisons (temps de calcul et complexité), le modèle *accumulation-based*, plus rapide, a été choisi pour la suite de l'étude.

Conclusion

L'approche multi-réservoirs est ainsi utilisée par le simulateur MFD développé par le LICIT pour la modélisation des flux de trafic à grande échelle. Le modèle *accumulation-based* s'appuyant sur le découpage de l'accumulation a été choisi par Guilhem Mariotte, post-doctorant et développeur du simulateur, pour des raisons de rapidités d'exécution.

Ce travail présenté dans ce document comprend deux axes de travail : le trafic et les émissions. Maintenant que la théorie exploitée pour modéliser le trafic a été décrite, nous allons décrire celle utilisée pour simuler les émissions.

¹ « The principle is that all users in a reservoir share the same space-mean speed (given by the MFD) at a given time, and exit once they have completed their individually assigned trip length. » (G. Mariotte, « Modélisation dynamique des grands réseaux de transport », 2018)

1.1.4 La plateforme de simulation MFD du trafic développée par le LICIT

L'intérêt du simulateur développé par le LICIT est de modéliser le flux du trafic de façon dynamique dans une zone urbaine à grande échelle. Pour ce faire, le LICIT s'appuie sur la théorie du MFD et utilise l'approche « multi-réservoirs » pour modéliser le flux dans le réseau d'une agglomération.

Cette partie se concentre sur la description de la zone d'étude et détaille le fonctionnement du simulateur, avec notamment les variables prises en compte dans le simulateur et les hypothèses de bases.

1.1.4.1 Entrées/sorties du simulateur MFD

Le simulateur MFD a pour mission de simuler les flux de trafic à grande échelle dans une zone urbaine en s'appuyant sur l'approche multi-réservoirs. Il est développé sur Matlab par le post-doctorant Guilhem Mariotte.

Dans ce simulateur, le réseau de la ville considérée est modélisé par un graphe avec des liens et des nœuds. Ce réseau est découpé en N réservoirs où est défini un MFD pour chacun d'entre eux. La frontière d'un réservoir est un ensemble de nœuds où la demande est générée.

Le simulateur MFD décrit la dynamique du trafic au cours d'une journée : il fournit ainsi les valeurs de l'accumulation et de la vitesse au cours de la journée pour chaque réservoir, sous forme d'un fichier de sortie. Pour ce faire, le simulateur prend en entrée 4 jeux de paramètres (voir les paramètres « 1 » à « 4 » sur la **Figure 8** ci-dessous).

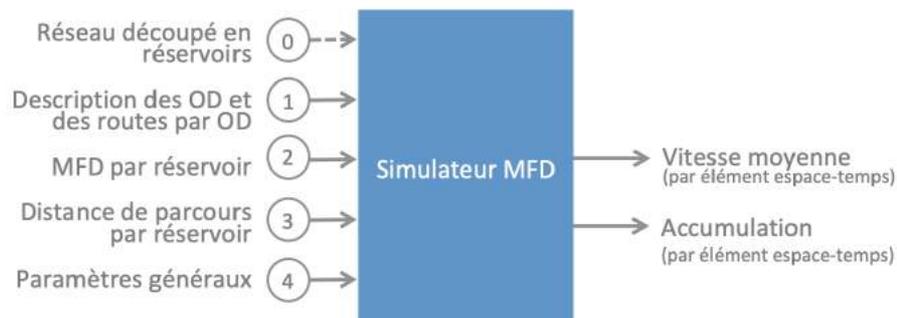


Figure 8 : Entrées et sorties du simulateur MFD développé par le LICIT, le découpage du réseau -donnée 0-est donnée indirectement par les jeux de données numérotés 1, 2, 3 et 4

Remarque : sur la **Figure 8**, le paramètre « 0 » décrivant le découpage du réseau en réservoir est indiqué avec une flèche en pointillés car l'information est incluse indirectement dans les autres paramètres d'entrée

Les paramètres d'entrée définissent ainsi l'offre et la demande :

- Paramètre d'entrée 1 : la **demande de trafic** au cours d'une journée, ou flux de véhicule au cours d'une journée avec le détail des Origines-Destinations (OD) et des chemins possibles pour chaque OD sous forme de matrice OD ;
- Paramètre d'entrée 2 : l'**offre du réseau** dans chaque réservoir, c'est-à-dire la capacité d'un réservoir à répondre à une demande grâce au MFD ;

- Paramètre d'entrée 3 : Les **longueurs de trajet** dans les réservoirs pour chaque chemin de chaque Origine-Destination (offre) ;
- Paramètre d'entrée 4 : d'autres **paramètres généraux** (par exemple, le pas de temps ou les conditions initiales).

I.1.4.2 Pré-traitement des données d'entrée

Les trois premiers paramètres d'entrée décrits ci-dessus nécessitent un pré-traitement. En effet, les paramètres d'entrées sont issus de données brutes telles que la description de trajets, la forme du réseau, des données de trafic et de la demande. La **Figure 9** illustre le fonctionnement détaillé du modèle de trafic avec notamment la phase de pré-traitement des données « (II) pre-processing » à partir des données brutes « (I) Input data ». Les paramètres d'entrée sont représentés en bas du pré-traitement sur la **Figure 9**.

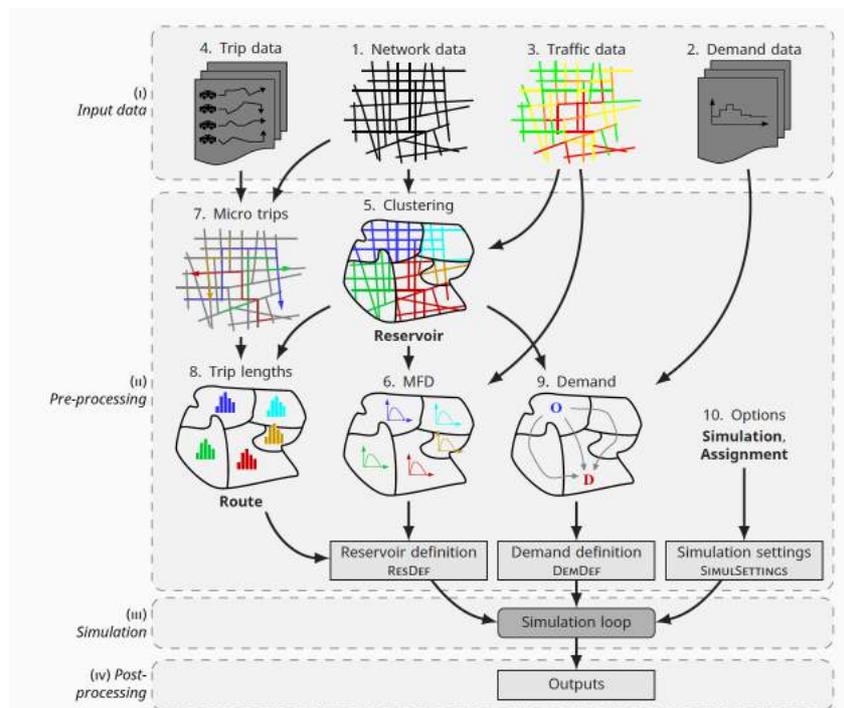


Figure 9 : Fonctionnement général du modèle de simulation MFD avec la phase de pré-traitement (G. Mariotte, 2018)

L'ensemble des données brutes (« (I) Input data » sur la **Figure 9**) qui permettent d'obtenir les paramètres d'entrée sont :

- « 1. Network data » : le réseau microscopique à partir duquel on définit les réservoirs
- « 5. Clustering » : décrit l'ensemble du réseau étudié avec l'ensemble des routes sous forme d'un fichier excel et QGIS (logiciel de cartographie).
- « 2. Demand data » : la demande (obtenue à partir de données socio-économiques EMD et d'un traitement par un modèle à 2 étapes) sous forme de fichier excel.
- « 3. Traffic data » : les données de trafic (provenant de capteurs de comptage du trafic et de traces GPS) sous forme de base de données excel fournie par des acteurs extérieurs,
- « 4. Trip Data » : les trajets microscopiques à l'échelle du lien (les trajets sont créés à partir d'un algorithme de plus court chemin sur le réseau microscopique) sous forme de fichier matlab.

Par exemple, les MFD par réservoir sont calculés à partir du découpage du réseau en réservoirs « 5. Clustering » et des données trafic « 3. Traffic Data ».

Conclusion

Le simulateur MFD destiné à décrire la dynamique du réseau urbain à grande échelle est développé sur Matlab. L'exécution du simulateur MFD nécessite une phase de pré-traitement des données brutes qui fournit en entrée pour le simulateur plusieurs bases de données (il s'agit bien des données pré-traitées « Pre-processing») décrivant à la fois les réservoirs (MFD et distance de parcours dans chaque réservoir), la demande (matrice OD avec description des routes par OD) et des paramètres complémentaires. Le simulateur MFD génère alors en sortie la description des vitesses moyennes et de l'accumulation par réservoir au cours du temps.

Dans un objectif de créer un modèle couplé trafic-émissions, nous allons maintenant nous pencher sur le modèle d'émissions.

Après la description de la théorie exploitée pour modéliser le trafic, nous allons décrire celle utilisée pour simuler les émissions

1.2 Le modèle d'émission de polluants : COPERT V

Parmi les polluants atmosphériques émis par le trafic routier, on distingue deux catégories :

- les polluants de l'air, également appelés polluants locaux, qui englobent les gaz nocifs et les particules aériennes ayant un impact sur la santé. Parmi eux, on trouve l'oxyde d'azote (NO_x), les particules en suspension de diamètre inférieur à 10µm et 2,5µm (PM₁₀ et PM_{2,5}), les composés organiques volatils (COV), etc.
- les gaz à effet de serre qui participent au changement climatique, parmi lesquels notamment le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane.

Les sources d'émissions sont diverses : on trouve ainsi les émissions à l'échappement liées à la combustion, les émissions d'évaporation du carburant, les émissions par usure et enfin les émissions liées à la remise en suspension des particules causée par le trafic. Enfin, ces émissions sont soumises à des variations en fonction des conditions du trafic (vitesse, etc), des caractéristiques du véhicule (motorisation, carburant, etc), de l'environnement (pente, etc) et des conditions environnantes (humidité environnante).

A partir de données empiriques recueillies en laboratoire (bancs de rouleau) et en conditions réelles de trafic, les modèles d'émission calculent les émissions en polluant en prenant en compte les différents phénomènes d'émissions présentés ci-dessus. La partie ci-après décrit le fonctionnement du modèle d'émission utilisé dans cette étude : COPERT V.

1.2.1 Le choix du modèle d'émission : modèle COPERT

Il existe plusieurs modèles d'émission utilisés en Europe tels que COPERT, HBEFA ou encore Phem. Les modèles d'émission utilisés varient en fonction de l'échelle d'étude et de la façon de prendre en compte l'état de trafic (voir **Figure 10**).

Le modèle Phem (*Passenger car and Heavy duty Emission Model*) est basé sur le fonctionnement du moteur ou du véhicule. Il ne peut pas être utilisé dans cette étude car il s'agit d'un modèle instantané qui fournit les valeurs d'émission directement à partir du détail de la trajectoire du véhicule. Ceci n'est possible qu'avec les modèles de trafic microscopiques, non utilisés ici.

Les modèles HBEFA (*HandBook of Emissions Factors*) et COPERT (*COmputer Program to calculate Emissions from Road Transport*) sont utilisés pour des échelles spatiales plus agrégées, par exemple à l'échelle d'une agglomération. Cependant, le modèle HBEFA tient compte des conditions de circulation (fluides et congestionnées) et possède une valeur par état de trafic, tandis que COPERT s'appuie sur des vitesses de parcours moyennes. C'est pourquoi ce dernier modèle est choisi dans cette étude.

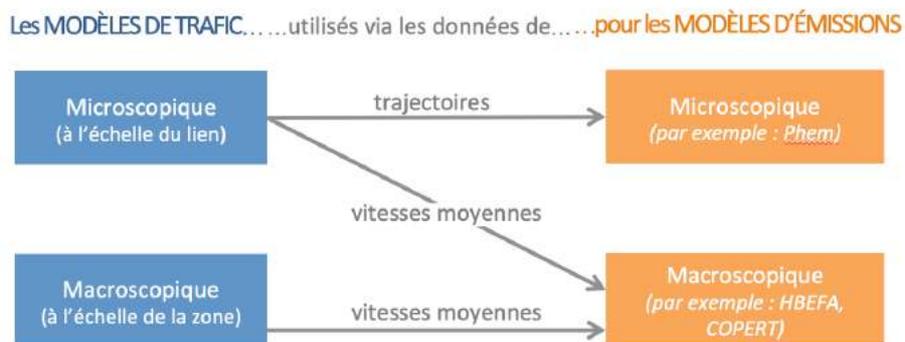


Figure 10 : Utilisation des modèles d'émission en fonction des modèles de trafic

1.2.2 Le modèle d'émission européen COPERT version V

Le modèle d'émission sur lequel s'appuie l'étude est le modèle d'émission européen COPERT version V, destiné à fournir des informations sur l'évolution de la pollution routière à travers des évaluations environnementales. Son développement est coordonné par le AEE dans le cadre du European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation. La méthode COPERT est développée en accord avec le guide européen EMEP/AEE.

Le modèle COPERT intègre plusieurs types d'émission qui sont les émissions à chaud, les émissions à froid et les émissions hors échappement comme l'évaporation du fuel et l'usure des pneus et des freins. Il différencie également plus de 450 types de véhicules différents regroupés dans les catégories suivantes : les véhicules particuliers (VP), les véhicules utilitaires légers (VUL), les poids lourds (PL) et les deux roues motorisés.

1.2.3 Principe de fonctionnement de COPERT V

Dans COPERT V, le calcul des émissions de polluants pour un type de véhicule s'appuie sur l'utilisation de la formule suivante :

$$E(\bar{v}) = A \times FE(\bar{v})$$

où E est l'émission de polluants (en grammes), A est l'activité des émetteurs (en véh.km) et FE est un facteur d'émission unitaire qui dépend de la vitesse moyenne \bar{v} (en g/km/véh). Pour le transport routier, l'activité A représente la distance totale D parcourue par l'ensemble des véhicules. Elle sera ici estimée de la manière suivante :

$$A = Acc \times \bar{v} \times Delta_T$$

avec Acc l'accumulation (en véh.h) et la vitesse \bar{v} (en km/h) et $Delta_T$ temps pendant lequel le véhicule roule à la vitesse \bar{v} .

Le facteur d'émission FE désigne la quantité de polluants émis par un véhicule spécifique sur un parcours d'un kilomètre, en fonction de la vitesse du véhicule (voir **Figure 11** ci-dessous pour des courbes de COPERT IV). Il est déterminé à partir de traitements statistiques de données expérimentales obtenues principalement en laboratoire pour différents cycles d'essais représentatifs des conditions réelles de circulation pour une vitesse donnée. La courbe du FE diffère en fonction du polluant et des caractéristiques suivantes du véhicule :

- type de véhicule : VP, VL, VUL (<3,5 tonnes), PL (dont autobus et autocars), deux roues motorisés
- mode de carburation (essence, diesel)
- poids total autorisé en charge pour les poids-lourds
- date de mise en circulation pour les normes Euro et l'âge du véhicule

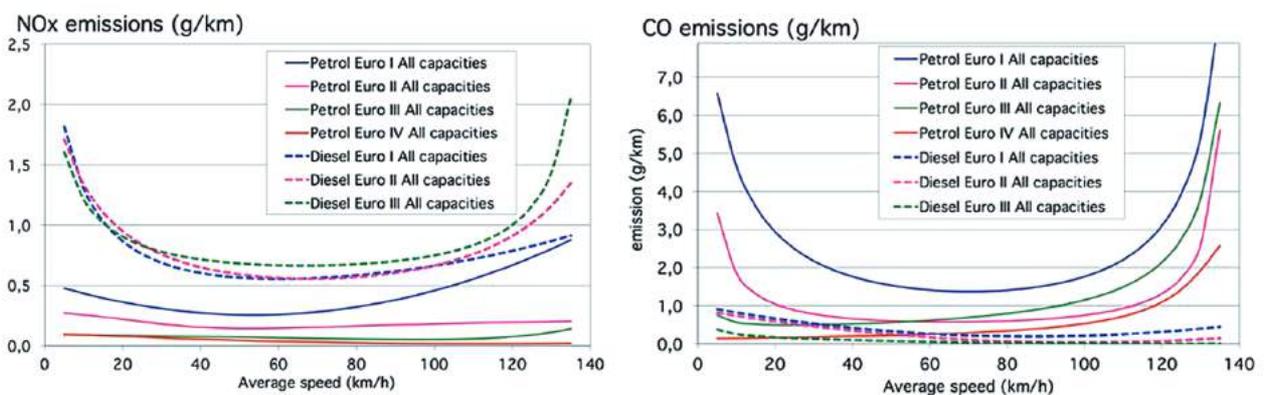


Figure 11 : Courbes types d'émission de la méthode COPERT IV : NOx et CO (tous types de voitures essence et diesel). (André, 2015)

Puisque les émissions diffèrent selon les caractéristiques des véhicules, la valeur de l'émission globale est calculée en faisant la somme des émissions par type de véhicule

$$E_{Total} = E_{VL} + E_{VUL} + E_{PL} + E_{BUS} + E_{2\text{ roues}}$$

$$= D_{VL} F E_{VL}(\overline{v_{VL}}) + D_{VUL} F E_{VUL}(\overline{v_{VUL}}) + \dots$$

1.2.4 Hypothèses d'utilisation de COPERT V dans l'étude

La présente étude utilise la dernière version de COPERT développée, à savoir la version V. De plus, on se concentre sur les émissions à chaud qui dépendent fortement des conditions de trafic. Enfin, seuls les polluants suivants sont pris en compte : le CO₂ pour le climat et les NOx et PM10 pour les questions de santé.

On pose les hypothèses suivantes :

- hypothèse 0 : la pente et la charge des PL et VUL sont nulles et il n'y a aucun véhicule à 2 roues motorisés.
- hypothèse 1 : la vitesse moyenne de tous les types de véhicules est la même i.e. $\overline{v_{VL}} = \overline{v_{VUL}} = \overline{v_{PL}} = \overline{v_{BUS}}$
- hypothèse 2 : le parc est homogène par réservoir et même sur tous les réservoirs

Le calcul des émissions totales se fera sous l'influence de ces hypothèses.

1.3 Le modèle couplé trafic-émissions

La **Figure 12** ci-dessous illustre le modèle couplé trafic-émission à travers le couplage des outils simulateur MFD-COPERT V. Outre la composition du parc, COPERT V prend en entrée la vitesse moyenne et l'accumulation fournies par le simulateur de trafic MFD.

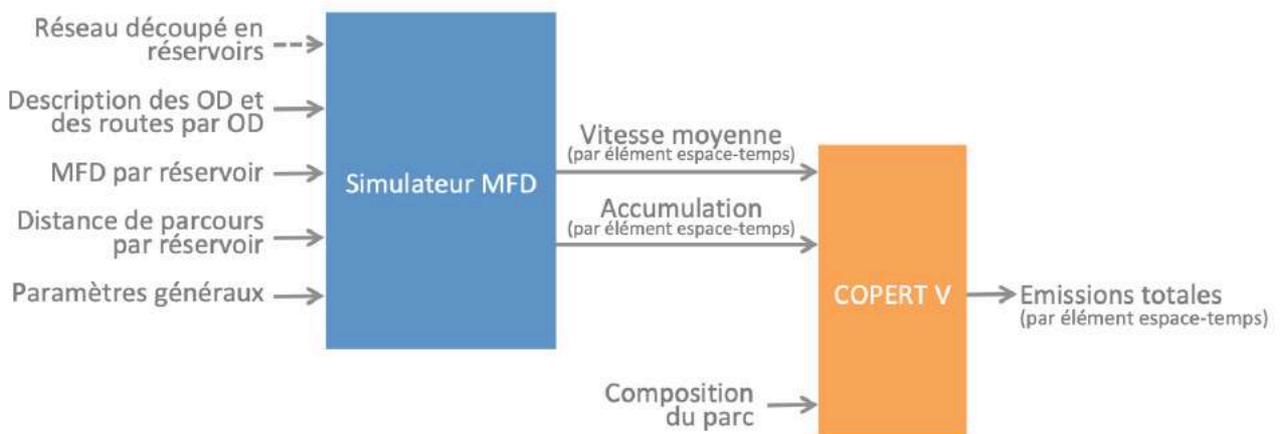


Figure 12 : Modèle couplé trafic-émission développé par le LICIT

Conclusion

Le modèle couplé trafic-émission développé pour une grande-échelle par le LICIT s'appuie sur la théorie du trafic avec l'approche multi-réservoirs et les MFD et sur le modèle européen d'émission COPERT V. Le simulateur de trafic MFD renvoie un fichier de sortie décrivant la vitesse moyenne et l'accumulation par réservoir au cours d'une journée. Ces données issues du modèle de trafic constituent les données d'entrée nécessaires pour le calcul des émissions avec COPERT V. On obtient ainsi l'évolution des émissions totales par réservoir au cours d'une journée pour l'évaluation environnementale : c'est le modèle couplé trafic-émission.

Maintenant que la théorie du modèle couplé trafic-émissions a été décrite, nous allons nous intéresser à la mise en place de la simulation.

Chapitre 2.

Contexte de l'étude et mise en place de la simulation couplée

L'étude consiste à modéliser les émissions de polluants dans la métropole de Lyon au cours d'une journée. Pour cela, on dispose d'un modèle couplé trafic-émission développé par le LICIT. On se pose la question de la pertinence d'un tel outil pour la prévision des émissions de polluants routiers sur la ville de Lyon. L'étude se focalise également sur les paramètres du calibrage des données et du découpage spatial.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord décrire la zone d'étude, pour laquelle nous développerons la problématique du découpage spatial. Puis, nous nous intéresserons aux nombreuses bases de données 2018 utilisées pour réaliser la simulation de trafic : elles permettent notamment de générer les données d'entrée du simulateur. La richesse des bases de données nous a amené à nous questionner sur l'impact du calibrage du modèle avec des données 2011 et celles 2018. Le modèle de simulation fonctionne déjà avec des données 2011 et nous présenterons donc les étapes de préparation des fichiers d'entrée avec les données 2018. Enfin, la pertinence du modèle couplé trafic-émissions peut être analysée en comparant les émissions estimées avec une autre base de données : c'est ce que nous allons voir en 3^{ème} partie.

II.1 Description de la zone d'étude : la zone urbaine de Lyon

Nous allons à présent introduire la zone d'étude sur laquelle le Simulateur-MFD a été testé au sein du LICIT : il s'agit de la zone urbaine de Lyon.

La métropole de Lyon possède la seconde plus grande aire urbaine de France avec plus de 1,3 millions d'habitants en 2016 et c'est sur son réseau routier que l'étude du présent document va s'appuyer.

II.1.1 Le réseau routier de la zone urbaine de Lyon

Le réseau routier sélectionné pour l'étude se situe sur la métropole du Grand Lyon comprenant les communes de Lyon, Villeurbanne, Sainte-Foy-lès-Lyon, une partie de Caluire-et-Cuire et de Tassin-la-Demi-Lune et autres. Il intègre le périphérique et les routes urbaines où circulent les véhicules motorisés.

Le réseau routier est modélisé par un graphe où les sommets sont les intersections et les liens sont les routes reliant deux intersections comme on peut le voir sur la **Figure 13**. Le graphe est orienté, c'est-à-dire qu'un lien représente un seul sens de circulation. On appellera communément ce réseau le « réseau Symuvia » car il s'agit de la représentation utilisée pour le logiciel de simulation du trafic Symuvia développé par les membres LICIT. Il est représenté dans le référentiel Lambert 93 (ESPG : 2154) et sert de base de référence pour les travaux du LICIT. Ce réseau est composé de 19967 liens.

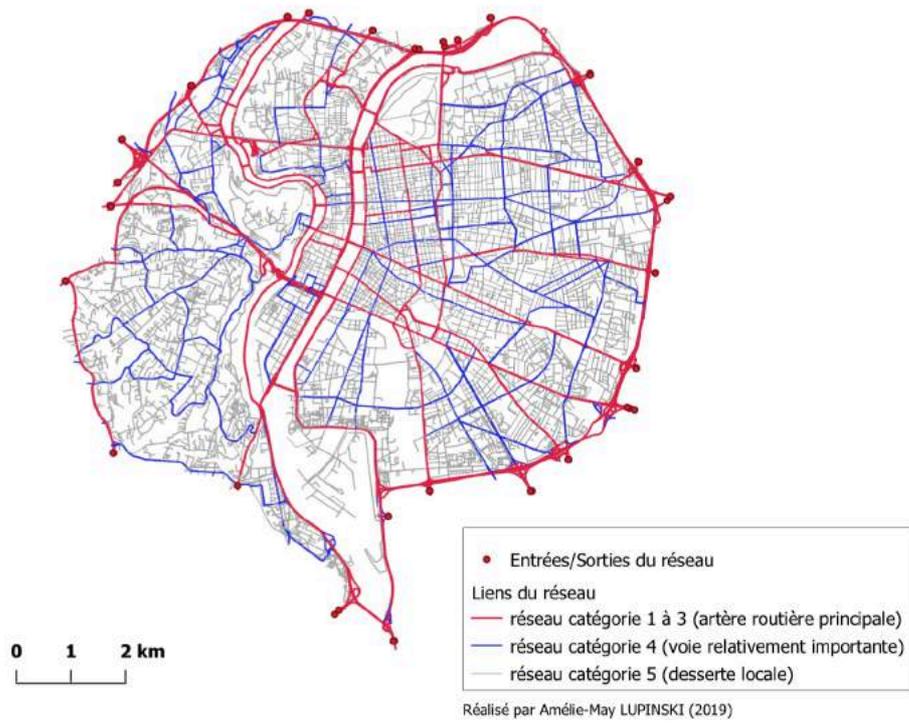


Figure 13 : Réseau urbain de la métropole de Lyon : "Réseau Symuvia" (QGIS)

On dispose d'un fichier d'extension .mat fonctionnelle (voir **Figure 14**) décrivant chaque lien avec un identifiant de lien, le nombre de voies, la longueur de la voie, la vitesse limite et leur catégorie. La catégorie fonctionnelle est un attribut qui évalue la qualité structurante de la voie dans le réseau, 5 étant considéré comme indiquant une voie peu importante et 1 comme une artère routière majeure telle que les grands boulevards, ou le périphérique.

Fields	ID	Axe	Points	NumLanes	SpeedLimit	SpeedCat	FuncClass	NodeDownID	NodeUpID	Length	MeanTravelTime	capafeu
13	'T_1000826115_FRef_F'	'RUE DES ... [8.4074e+05...		1	13.8889	11.2500	5	3588 [6176,6178]		178.1029	12.8234	1
14	'T_1000843009_FRef_F'	'IMPASSE... 2x9 double		1	2.7778	2.7778	5	3708 5883		200.7537	72.2713	1
15	'T_1000843011_FRef'	'IMPASSE... [8.4069e+05...		1	13.8889	11.2500	5	1768 168		88.1084	6.3438	1
16	'T_1000843011_toRef'	'IMPASSE... [8.4061e+05...		1	13.8889	11.2500	5	18162 [1769,1770]		88.1084	6.3438	1
17	'T_1000843013_FRef_F'	'RÉSIDEN... 2x15 double		1	8.3333	5.6944	5	18016 [1768,1770]		179.0942	21.4913	1
18	'T_1000843014_FRef_F'	'RÉSIDEN... 2x15 double		1	8.3333	5.6944	5	1769 21		186.6246	22.3950	1

Figure 14 : Capture d'écran du fichier décrivant les liens du réseau avec notamment les informations d'identifiant de lien (« ID »), le nombre de voies (« NumLanes »), la longueur de la voie (« Length »), leur catégorie (« FuncClass »)

Les véhicules modélisés circulent sur les liens de ce réseau. Mais le réseau n'est pas isolé : il existe des véhicules venant de l'extérieur et finissant leur trajet dans le réseau, ou bien des véhicules ayant une destination hors du réseau ou encore des véhicules ne faisant que traverser le réseau. Pour cela, des nœuds d'entrée et de sortie du réseau ont été définis (points rouges sur la **Figure 13**: 29 nœuds d'entrée et 28 nœuds de sortie). Ils permettent de modéliser les véhicules entrants et sortants sur le réseau. Ainsi, tout véhicule venant de l'extérieur du réseau passe par un des nœuds d'entrée et tout véhicule sortant du réseau passe par un des nœuds de sortie.

Afin d'appliquer l'approche multi-réservoirs à ce réseau routier, ce dernier a été partitionné en s'appuyant sur une découpage géographique déjà existante : la zone IRIS. Nous allons aborder cette notion dans la partie suivante.

II.1.2 Découpage du réseau routier en zones IRIS

Le découpage du réseau routier s'appuie sur les zones IRIS (voir **Figure 15**).

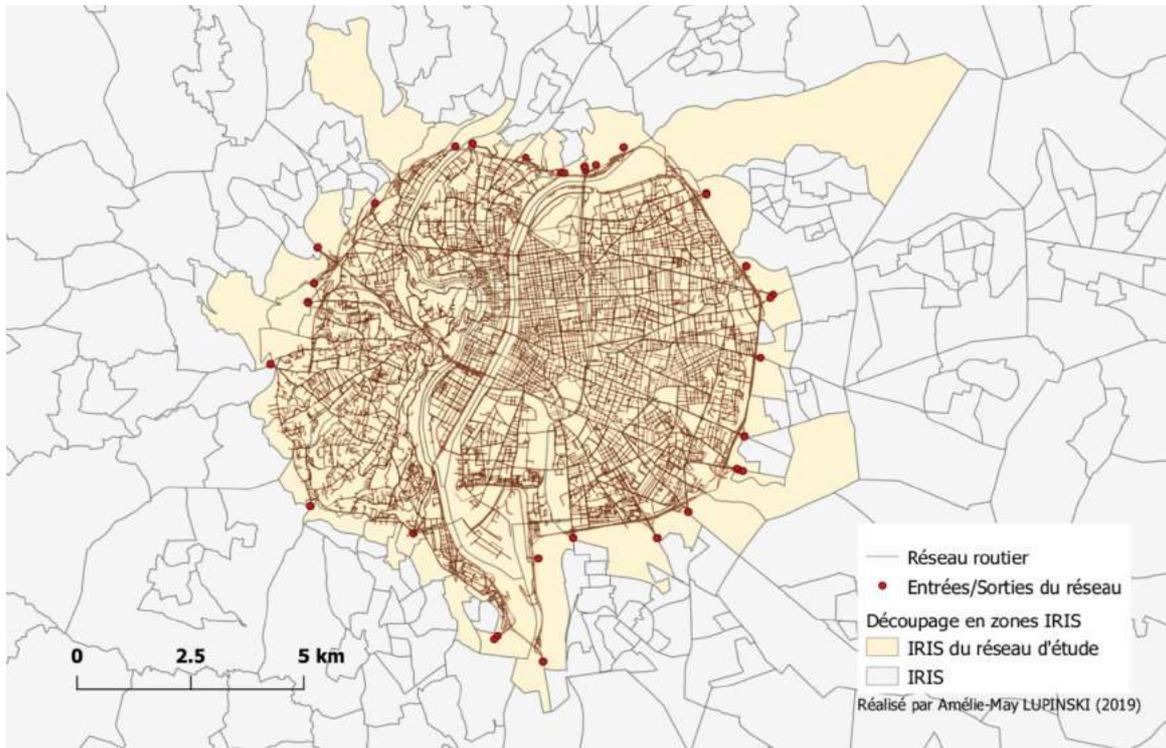


Figure 15 : Réseau Symuvia et découpage du territoire en zones IRIS (QGIS)

Une zone IRIS est un découpage géographique qui respecte des critères démographiques et géographiques en France et dans les DOM. Le mot IRIS signifie « Ilots Regroupés pour l'Information Statistique » et ce découpage a été créé par l'INSEE à des fins de recensement de la population. Les communes de plus de 10 000 habitants ainsi qu'une forte part des communes entre 5 000 et 10 000 habitants sont concernés par le découpage. Il faut savoir que les contours des zones IRIS se veulent « sans ambiguïté et stables dans le temps » (INSEE, 2016), il s'agit donc d'un découpage qui assure une pérennité dans le temps. Le découpage des zones IRIS se fait à l'aide de plusieurs critères et on distingue 3 catégories d'IRIS :

- Les IRIS d'habitat : leur population se situe en général entre 1 800 et 5 000 habitants. Ils sont homogènes quant au type d'habitat et leurs limites s'appuient sur les grandes coupures du tissu urbain (voies principales, voies ferrées, cours d'eau...) et représentent 92% des IRIS en 2008.
- Les IRIS d'activité : ils regroupent plus de 1 000 salariés et comptent au moins deux fois plus d'emplois salariés que de population résidente. Ils représentent 5% des IRIS en 2008.
- Les IRIS divers : il s'agit de zones spécifiques peu habitées et ayant une superficie importante (parcs de loisirs, zones portuaires, forêts...).

La définition d'IRIS d'habitat est intéressante ici parce qu'elle prend en compte le réseau routier d'une ville, et évite donc au maximum les situations de route coupée en deux. La zone d'étude comprend ainsi 285 zones IRIS-géographie 2018.

La modélisation du réseau s'appuie sur ce découpage pour partitionner le réseau en un nombre N de réservoirs.

II.1.3 Découpage en N réservoirs : les deux agrégations étudiées

Le découpage du réseau est une étape de base pour la suite de l'étude : c'est sur ce découpage spatial qu'on va mesurer la qualité de la modélisation couplée présentée dans le Chapitre 1.

Des découpages ont été proposés dans les travaux de Yann Lebrech, ancien stagiaire au LICIT (Y. Lebrech, 2017). Il a développé un algorithme pour calculer le MFD d'un regroupement de zones IRIS et étudie la qualité des MFD. Il propose ainsi plusieurs découpages basés sur des critères de vitesse. Il étudie ainsi le critère de similarité de vitesse moyenne par zone IRIS, le critère de corrélation entre les profils de vitesse moyenne typique sur un jour.

Finalement, le découpage retenu pour cette étude a été proposé par Guilhem Mariotte et Sergio Batista, ancien doctorant du LICIT. Ils ont ainsi proposé un découpage à 5, 10 et 11 réservoirs vérifiant l'ensemble de critères suivants :

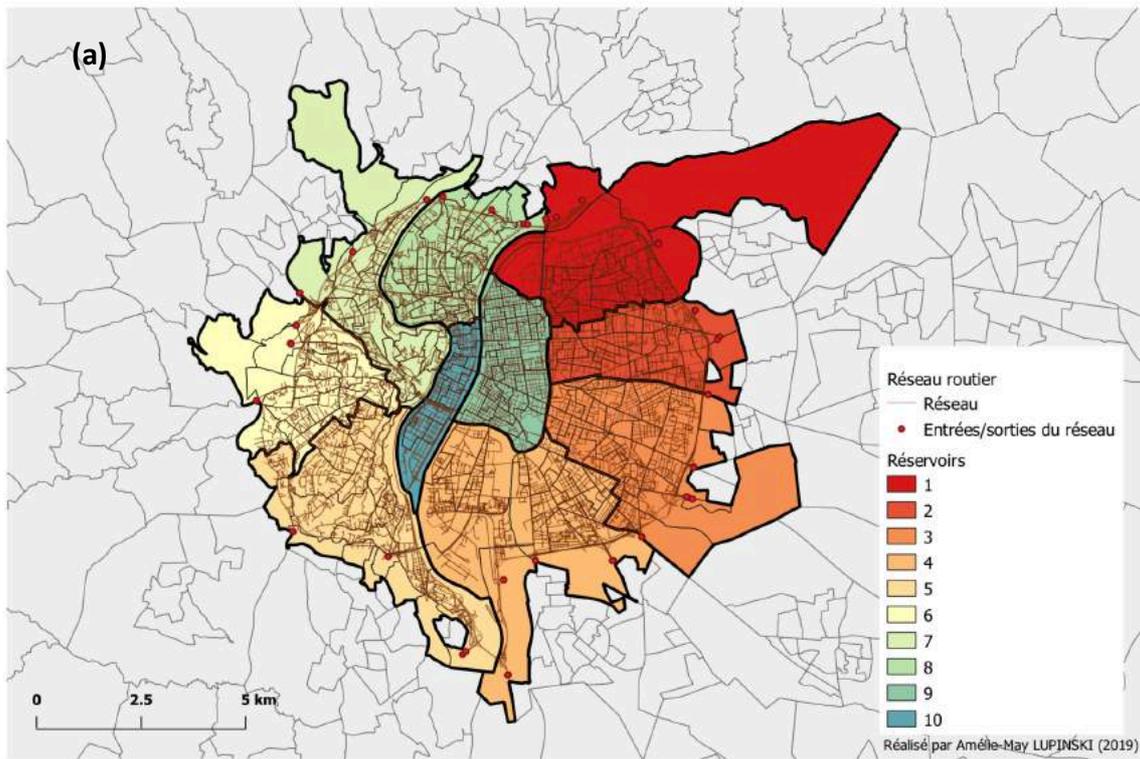
- Respecter la topologie naturelle du réseau (Rhône et Saône) ;
- Garantir des formes de réservoirs les plus compactes i.e. les plus convexes, de façon à éviter des cas où un véhicule sort d'un réservoir puis y ré-entre, dedans. En effet, une propriété des formes convexes est qu'une ligne droite quelconque ne peut traverser la forme plus de deux fois ;
- S'assurer que les axes majeurs passent au centre des réservoirs et non pas à la frontière. Dans la mesure où ce sont ces axes qui concentrent le trafic, ce critère permet d'avoir le trafic le plus homogène possible ;
- Avoir des MFD qui soient bien définis pour chaque réservoir.

Le découpage en 5 réservoirs est considéré comme trop agrégé : c'est finalement le découpage en 10 réservoirs qui sera choisi pour la suite de l'étude.

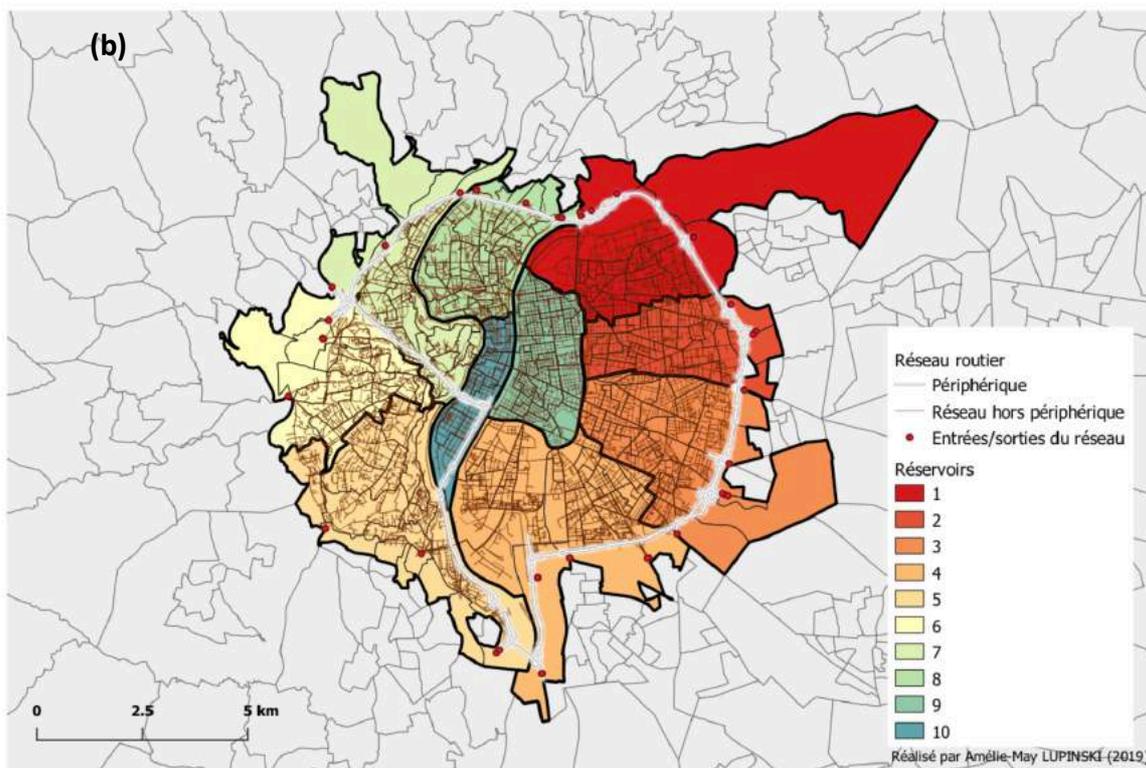
La question de l'homogénéité des réservoirs est fondamentale pour la forme des MFD et donc pour la modélisation de la dynamique du trafic. Or, la ceinture périphérique fait partie du réseau routier considéré dans l'étude et les conditions de circulations sur ce type de voie sont particulières. On pense notamment à la vitesse limitée à 70km/h sur le périphérique contre 50 ou 30km/h en ville. On pense également à la raison de sa mise en place qui est de contourner l'agglomération. **Considérer les liens du périphérique au milieu des autres liens urbains rendrait-il le trafic non homogène ? Quelle incidence la présence des liens du périphérique au sein des réservoirs a-t-elle sur les résultats de simulation du trafic et donc des émissions ? Les résultats seront-ils améliorés si on considère le périphérique à part, sous-entendu comme un réservoir à part entière ?**

Afin de prendre en considération les spécificités du périphérique en tant que voie rapide, nous avons été amenés à étudier deux types de découpage :

- un découpage classique à 10 réservoirs (voir **Figure 16.a**)
- un découpage qui considère le périphérique à part : nous l'appellerons découpage en « 10+P » réservoirs pour le distinguer du découpage en 11 réservoirs évoqué plus haut (voir **Figure 16.b**). Le périphérique a été défini par Jean Krug, post-doctorant du LICIT comme un ensemble de liens du réseau Symuvia.



Carte de la zone urbaine de Lyon, avec un découpage en 10 réservoirs



Carte de la zone urbaine de Lyon, avec un découpage en 10 réservoirs + périphérique

Figure 16 : Deux découpages étudiés dans l'étude :
 (a) découpage en 10 réservoirs (b) découpage en 10+P réservoirs (réalisé sur QGIS)

Conclusion

Le découpage en N réservoirs est la première étape de la modélisation. C'est sur ce découpage spatial que les résultats d'évolution du trafic et d'émissions de polluants vont être obtenues. Le périphérique a des conditions de circulation différentes des routes en ville, c'est pourquoi deux découpages seront étudiés : le découpage en 10 réservoirs et le découpage en 10+P réservoirs qui distingue le périphérique comme un réservoir.

La suite du travail se basera sur la comparaison du découpage à 10 et 10+P réservoirs. La préparation des données pour la simulation sera donc réalisée pour ces deux découpages distincts comme nous allons le voir dans les deux parties suivantes.

II.2 Préparations des données de la plateforme de simulation MFD du trafic

L'utilisation de la plateforme de simulation-MFD du LICIT nécessite de définir les paramètres d'offre et de demande sous forme de données d'entrée (Cf §I.1.4.1 du Chapitre 1). Ces données d'entrée sont calibrées sur une base de données brutes, c'est-à-dire qu'elles sont issues de ces données.

Le LICIT a calibré son simulateur MFD avec des données de février 2011 : demande évaluée sur des données de 2011, MFD réalisé à partir de données de février 2011, etc. Par ailleurs, le LICIT dispose de données sur l'année scolaire 2017-2018¹ qui permettent de calibrer le simulateur avec des données plus récentes et plus riches. **Quel calibrage permet d'avoir des résultats du simulateur-MFD les plus satisfaisants ? Peut-on observer une différence entre les MFD 2011 et les MFD 2018 ? Si oui, est-elle conséquente et pourquoi ?**

Une partie du travail réalisé dans cette étude consiste donc à faire un calibrage des entrées avec les données de 2018. Afin de faire une comparaison entre les deux données, on choisit de se focaliser sur le même mois : on utilisera ainsi uniquement les données de février 2018 pour la suite de l'étude.

¹ Nous verrons plus tard que les données seront calibrées sur l'année 2018 seulement : on parlera ainsi de calibrage 2011 et de calibrage 2018

La **Figure 17** montre la diversité des données nécessaires au pré-traitement pour le simulateur MFD.

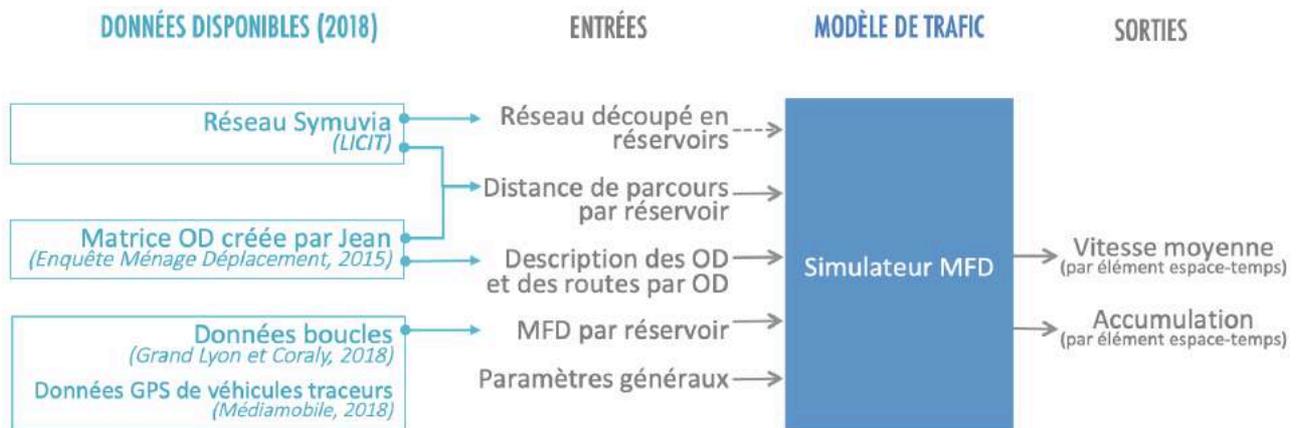


Figure 17 : Données nécessaires pour préparer les données d'entrée du simulateur MFD

Cette partie est consacrée à la façon dont a été réalisé le calibrage 2018 des données d'entrée ainsi qu'à la présentation des données d'émission. On présentera ainsi le calibrage des données suivantes :

- Paramètres généraux
- MFD par réservoir
- Description des OD et des routes par OD
- Distance de parcours par réservoir

Pour chaque donnée d'entrée, on fera la description des données brutes qui l'ont générée (en bleu clair sur la **Figure 17**) et nous définirons les hypothèses du calibrage de ces données.

II.2.1 Les paramètres généraux

Les paramètres généraux définissent la période de simulation et le pas de temps. On a choisi de faire une simulation sur la période 4h-minuit, et ce, pour les raisons suivantes :

- prise en compte des deux pics de congestion de la journée (un le matin et un le soir),
- saisie de la montée de congestion, c'est-à-dire la possibilité d'observer l'augmentation de la demande et l'apparition de la congestion,
- chargement du réseau avant l'apparition de la congestion, ce qui signifie que l'on fait circuler des véhicules sur le réseau avant l'augmentation de la demande. En effet, le réseau n'est jamais vide au moment de l'apparition de la congestion, et ce serait une erreur de commencer la simulation au début de la congestion.

Le pas de temps se situe entre 10 secondes et 30 secondes. Choisir un pas de temps de 30s permet d'avoir un fichier de sortie moins volumineux, d'où le choix du pas de temps à 30 secondes dans la suite de l'étude.

II.2.2 Implémentation de l'offre : estimation des MFD 2018 par réservoirs

On suppose que les MFD sont définis dans chaque réservoir. Pour obtenir les MFD 2018, on s'appuie sur l'algorithme d'estimation des MFD 2011 réalisé par Yann Lebrech. L'algorithme réalise les MFD de chaque réservoir en traçant la production (véh.m/s) en fonction de l'accumulation (véh/s) comme sur la **Figure 18**. L'algorithme a été codé sur R et est décrit dans le rapport (Y. Lebrech, 2017).

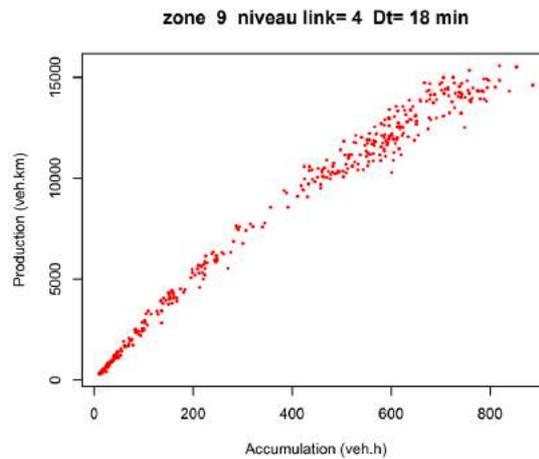


Figure 18 : Exemple de sortie de l'algorithme de Y. Lebrech : MFD 2011 du réservoir 9 pour un découpage à 10 réservoirs

La **Figure 18** est un exemple de sortie de l'algorithme d'élaboration du MFD. Chaque point du MFD représente la production en fonction de l'accumulation sur un pas de temps D_t pour un nombre n de jours. Le MFD est tracé en s'appuyant sur la formule $Vitesse = Production/Accumulation$. Pour cela, l'algorithme calcule successivement, pour tous les réservoirs et à chaque pas de temps D_t , la production P_{res,D_t} d'un réservoir ;

$$P_{res,D_t} = coef f_{res} \times \sum_{\text{liens ayant des capteurs de comptage}} P_{lien,D_t}$$

avec $\begin{cases} coef f_{res}: \text{le coefficient de facteur d'échelle du réservoir} \\ P_{lien,D_t}: \text{la production d'un lien où il y a un capteur de comptage, pendant } D_t \end{cases}$

Des capteurs de mesure du trafic sont placés au niveau de certains liens du réseau, ils comptent le nombre de voitures qui circulent sur ce lien pendant un pas de temps élémentaire Δ . Le mécanisme de fonctionnement de ces capteurs de comptage est détaillé dans la suite du document dans le paragraphe II.2.2.1.

Ainsi on a :

$$coef_{res} = \frac{\sum_{\text{liens du reservoir}} (\text{longueur lien} \times \text{nombre de voies du lien})}{\sum_{\text{liens où il y a un capteur de comptage}} \text{longueur lien}} > 1$$

et,

$$P_{lien,D_t} = D_t \times \text{longueur du lien} \times \sum_{t \in \{[0,\Delta[, [\Delta,2\Delta[, [2\Delta,3\Delta\}}$$

NB) la valeur de D_t vérifie la propriété suivante : $\exists \alpha \in \mathbb{N}^*$, tel que $D_t = \alpha\Delta$

1. La vitesse moyenne $\overline{v_{res,D_t}}$ d'un réservoir ;

$$\overline{v_{res,D_t}} = \frac{\sum_{D_t} \text{distances parcourues dans le réservoir}}{\sum_{D_t} \text{temps de parcours dans le réservoir}}$$

2. Puis l'accumulation du réservoir comme le rapport de la production et de la vitesse

Nous allons maintenant détailler les données qui nous servent à calculer la production et la vitesse moyenne, c'est-à-dire respectivement les boucles électromagnétiques de comptages et les données GPS.

II.2.2.1 MFD 2018 : Données disponibles

Les boucles de comptage 2018 pour le calcul de la production :

Les boucles de comptage de comptage Criter sont des boucles électromagnétiques incorporées au sol qui permettent de détecter précisément la présence d'un véhicule (voir **Figure 19**). Elles peuvent également recueillir des informations telles que la vitesse, le taux d'occupation ou le débit et permettent d'estimer le nombre de véhicules passant sur le lien. La production de véhicules estimée sur le réservoir au niveau des liens équipés est ainsi connue. Pour avoir la valeur de la production totale de la zone, il faut la multiplier avec un coefficient de facteur d'échelle car toutes les boucles ne sont pas équipées.



Figure 19 : Les flèches rouges désignent des boucles de comptage pour véhicules motorisé dans une rue (Grand Lyon, 2019)

Les données de boucles de comptages utilisées dans l'étude ont été fournies par la métropole de Lyon, il s'agit des boucles de comptage Criter. On possède les données pour les mois d'octobre 2017 à septembre 2018 qui donnent un ensemble d'informations trafic. Les fichiers comptent environ 1319 boucles de comptage réparties sur tout le territoire d'étude (voir **Figure 20.a**). Bien que les liens du réseau Symuvia ne soient pas tous équipés en boucle de comptage, tous les réservoirs du réseau possèdent au moins 47 boucles de comptage (réservoir 5) et au plus 130 (réservoir 4) pour le découpage à 10 réservoirs. Ce sont des données nécessaires pour réaliser le MFD 2018.

En comparaison, les MFD 2011 ont été réalisés avec une même base de données de boucle de comptage à l'aide des données boucles de Février 2011. Il est intéressant de noter que le nombre de boucles de comptage était de 401 en 2011. De plus, on peut voir que certaines zones étaient peu fournies en capteur (dans le Sud-Ouest de Lyon sur la **Figure 20.b**). Ces chiffres révèlent que la base de données 2018 est plus riche que celle de 2011, comme l'illustre la répartition spatiale sur la **Figure 20.b**. L'utilisation des données 2018 se révèle être intéressante pour un calage du modèle au plus près de la réalité.

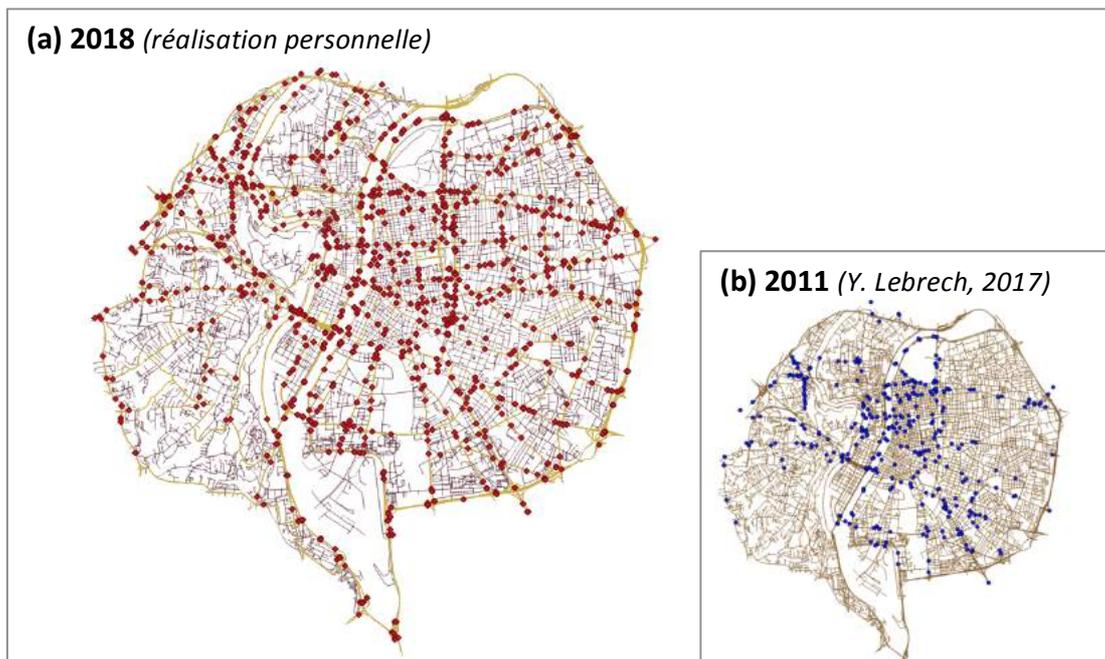


Figure 20 : Localisation des boucles de comptage sur le réseau Symuvia
(a) en rouge : boucles 2018 (réalisation personnelle sur QGIS) (b) en bleu : boucles 2011 (Y. Lebrech, 2017)

Les données boucles sont fournies sous la forme d'un fichier pour chaque mois. Pour chaque fichier, pour chaque boucle de comptage, sur un pas de temps de 6 minutes, on a les informations trafic suivantes :

- Les valeurs de débit horaire (en véh/h),
- Un indicateur de la qualité de la mesure du débit horaire. Sa valeur varie entre -1 et 6 où -1 désigne les mesures à ne pas prendre en considération et un chiffre entre 0 et 6 indique une valeur débit très proche de la réalité,

Enfin, la localisation des capteurs de comptage est disponible en licence ouverte sans restriction d'accès public à la date du Juin 2019 sur site data.grandlyon.com.

Les données GPS 2018 pour la mesure de la vitesse :

Les données GPS disponibles pour 2018 proviennent de véhicules traceurs (ou FCD, *Floating Car Data*) fournis par MédiaMobile. Ces données recueillent les positions GPS en latitude et longitude d'un ensemble de véhicules circulant sur la zone de Lyon. La zone de mesure des positions GPS inclut le réseau Symuvia comme on peut le voir à la **Figure 21**: la zone de mesure correspond aux points amont des liens du réseau FCD et le réseau Symuvia est en rouge sur la carte.

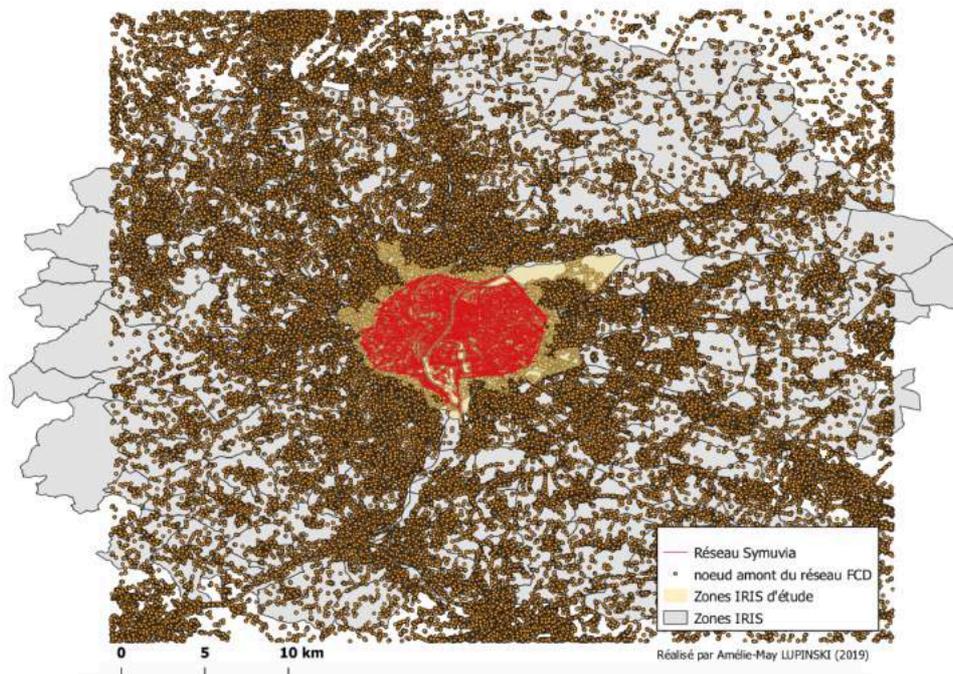


Figure 21 : Superposition du réseau Symuvia (en rouge) et des nœuds amont des liens du réseau FCD (points en marron)

L'utilisation de données GPS permet de calculer la vitesse moyenne comme le rapport de la distance totale parcourue sur un réservoir et du temps total parcouru sur ce même réservoir.

Tout comme les données boucles, on possède des données FCD sur la période d'octobre 2017 à septembre 2018. Après un traitement par Médiamobile, les données ont été réparties dans cinq répertoires fournissant une information différente :

- Répertoire « **Links** » : donne une description du réseau avec pour chaque lien, un identifiant, sa longueur et ses coordonnées GPS en format WGS84 (ESPG : 4326). Il s'agit d'un réseau indépendant du réseau Symuvia : il n'existe pas d'équivalence entre les liens des deux réseaux.
- Répertoire « **Positions** » : rassemble les données brutes de coordonnées GPS au format WGS84 avec l'identifiant du véhicule et l'heure et la date de la position.

- Les deux répertoires « Tracks » et « Observations » : les trajets sont regroupés par identifiant de véhicule dans « Tracks » et à chaque trajet correspond un ensemble d'observations (voir **Figure 22** ci-dessous). Les données brutes ont été projetées sur les liens du réseau par Médiamobile. Ainsi, chaque ligne d'observation de la **Figure 22** correspond à :
 - un lien emprunté par le véhicule (linkID),
 - avec des informations sur le taux de couverture de ce lien (coverage),
 - un timestamp correspondant à une date et une heure d'entrée estimée du véhicule sur le lien (timestamp),
 - et enfin une vitesse de parcours estimée sur ce lien (en km/h) (speedInKph)

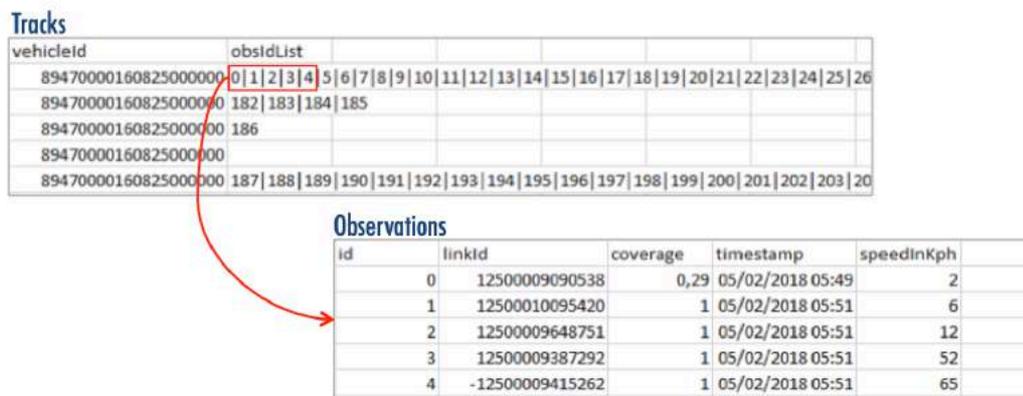


Figure 22 : Extrait des fichiers « Tracks » et « Observations » du 5 février 2018

- Répertoire « speeds » : donne une vitesse moyenne sur chaque arc toutes les 3 minutes.

Les données utilisées pour le calcul des vitesses moyennes par réservoir se résument aux trois dossiers « Tracks », « Observations » et « Links ». En effet, les données brutes du répertoire « Positions » semblent difficiles à utiliser car les coordonnées GPS sont imprécises de quelques mètres. De plus, nous profitons de la projection sur les liens pour avoir des calculs de distance plus précises et donc d'une distance proche de la réalité. Enfin, il n'est pas possible d'utiliser le dernier répertoire « Speeds » car le calcul de la vitesse moyenne par réservoir nécessite le détail des distances parcourues et des temps de parcours.

Pour donner un ordre de grandeur, au cours de la journée du 5 février 2018, on considère que les tronçons ont été empruntés au moins 176 485 fois (réservoir 8) et au plus 562 014 fois (réservoir 1) pour un découpage à 10 réservoirs.

NB) Le travail sur les données GPS de véhicules traceurs a également bénéficié aux recherches de Manon Seppecher, doctorante au LICIT. C'est pourquoi, dans le cadre de ses activités de recherche, une attention particulière a été fournie concernant ces données. Son regard sur les données a également permis de mettre en lumière les propriétés des données GPS et de s'attarder sur la pertinence des résultats trouvés.

II.2.2.2 MFD 2018 : hypothèses et méthode

Plusieurs hypothèses ont été mises en place pour l'élaboration des MFD par réservoir, lesquelles sont :

Critère de catégorie du réseau :

Seule une partie du réseau est considérée pour le calcul de la production, de la vitesse moyenne et de l'accumulation. Pour une question d'homogénéité des conditions de trafic, le réseau considéré est composé des liens de catégorie 1 à 4 uniquement.

La période temporelle choisie :

Les MFD sont calculés avec les données boucles et des données sur une semaine ouvrée (et non une semaine complète) par souci de taille de fichier et de temps de simulation. Etant donné que la simulation de 2011 avait été faite sur des ensembles de jours du mois de février 2011, on a choisi de faire la simulation sur la première semaine ouvrée de février. On utilise donc l'ensemble des données de la semaine du lundi 5 février 2018 au vendredi 9 février 2018.

Le pas de temps choisi :

L'algorithme de Y. Lebrech calcule les valeurs de production et d'accumulation sur des pas de temps de 18min. Il a été montré dans (Y. Lebrech, 2017) que le pas de temps de 18min donnait un MFD mieux défini sans trop de dispersion par rapport aux pas de temps de 6 et de 12 min. Les données permettant de calculer la production sont fournies agrégées à 6 minutes, c'est pourquoi les pas de temps étudiés sont des multiples de 6.

Finalement pour tous les MFD, on définit $D_t = 18 \text{ min}$. Cela signifie que les variables de vitesse, d'accumulation et de production sont calculées tous les D_t et que chaque point du MFD correspond à la valeur de la production en fonction de l'accumulation sur D_t pour les jours entre le 5 et le 9 février 2018.

Calcul de la production par réservoir :

Le calcul de la production n'a pas nécessité beaucoup de changement par rapport au code de 2011 étant donné qu'on exploite le même type de base de données mais sur une année différente (données boucles du Grand Lyon). Cependant, la base de données étant plus grande, il a fallu mettre à jour quelques informations.

Le calcul de la production par réservoir a besoin des variables de longueur de liens, une donnée non fournie par la base de données initiale. Pour remédier à cela, nous avons réalisé un map-matching manuel des positions des capteurs et du réseau Symuvia sur QGIS. En d'autres termes, nous avons superposé la carte du réseau Symuvia et la position des capteurs et nous avons fait concorder leur position géographique pour associer un capteur à un lien Symuvia.

Remarque : D'après (G. Mariotte et L. Leclercq, 2019), si on suppose que la demande totale est égale au flux total entrant, alors la production totale $P_{liens\ équipés\ d'une\ boucle\ de\ comptage}^{10h30-14h30}$ entre 10h30 et 14h30 s'écrit en fonction de la distance moyenne parcourue L (en m) et du débit $\lambda^{10h30-14h30}$ (en véh/s) sur cet intervalle de temps :

$$L \cdot \lambda^{10h30-14h30} = \frac{1}{\Gamma} P_{liens\ équipés\ d'une\ boucle\ de\ comptage}^{10h30-14h30}$$

avec $\Gamma \in \mathbb{R}^*$ un facteur d'échelle.

Ce résultat vient de l'application de la théorie des files d'attente dans la ville. Dans l'article, il est estimé les valeurs suivantes à l'échelle globale de la ville :

$$\Gamma = 0,062 \text{ et } \Gamma_{\min} = 0,022$$

Calcul des vitesses par réservoir (données FDC) :

Le calcul des vitesses par réservoir s'appuie sur la base de données FCD, ce qui diffère de la méthode utilisée par Y. Lebrech avec les données 2011. Les données 2011 s'appuyaient en effet sur des données taxis détaillées dans le chapitre 2.4 de (Y. Lebrech, 2017). Nous allons donc détailler la méthode de calcul des vitesses par réservoir à partir des données FCD.

Calculer les vitesses moyennes par réservoir revient à calculer les distances parcourues par réservoir et les temps de parcours par réservoir. Pour cela, on calcule la distance parcourue sur chaque lien d_{lien} (en m) et le temps de parcours t_{lien} (en s) pour chaque lien avec les données des répertoires « Observations » et « Links » en appliquant la formule suivante :

$$d_{lien} = \text{taux de couverture}_{lien} \cdot \text{longueur}_{lien}$$

puis, $t_{lien} = \frac{d_{lien}}{v_{lien}}$

La valeur de la longueur du lien provient du map-matching entre les coordonnées des capteurs boucles et le réseau Symuvia. On suppose ici que la longueur du lien sur lequel se trouve la boucle est la longueur du lien sur lequel on a assigné la boucle. Ceci peut paraître évident, mais il est important de noter que la valeur de la longueur du lien peut être différente si on fait le map matching avec un autre réseau, ceci est d'autant plus vrai que le map-matching a été réalisé manuellement pour plus de la moitié des boucles.

Dans la base de données « Observations », si on considère un véhicule, il est possible qu'à un même instant t , deux identifiants de lien soit indiqués. Or il n'est pas possible qu'un véhicule soit sur deux liens en même temps. Cela provient sans doute de la projection des coordonnées GPS sur les liens. En effet, comme les coordonnées GPS brutes sont imprécises à quelques mètres près, la projection peut se faire sur plusieurs liens différents comme résultats possibles, d'où la formulation de l'hypothèse suivante :

"pour un véhicule donné,
si celui-ci est indiqué comme se trouvant sur plusieurs liens différents à un même instant t
alors on ne conserve que le premier lien de la base de données"

Puis, on attribue les valeurs de distance parcourue sur un lien d_{lien} et de temps parcouru sur un lien t_{lien} à un réservoir. Pour cela, on s'aide des coordonnées GPS de chaque lien. Puisque les liens sont orientés, c'est-à-dire qu'ils ont un sens de circulation, on considère alors que la première coordonnée GPS est la coordonnée du début du lien. Et on attribue un réservoir à chaque lien selon l'hypothèse suivante :

"Un lien appartient à un réservoir R
si la coordonnée GPS du début du lien appartient à ce réservoir R "

Les travaux de M. Sepecher sur les données FCD ont mis en lumière des propriétés concernant les données du répertoire « Observations ». En particulier, son travail a relevé que la suite des liens parcourus par un véhicule ne se suivait pas toujours, par exemple la fin d'un lien parcouru ne correspond pas toujours au début du lien suivant. Ceci n'a pas d'impact sur le calcul de la vitesse moyenne dans un réservoir.

On peut se poser la question de la qualité des résultats de distance et de temps obtenus. Par exemple, on peut se demander quelle est la marge d'erreur avec des valeurs réelles. Puisque le temps de parcours est corrélé à la distance de parcours et à la vitesse sur ce tronçon, lors il suffit d'étudier la valeur de la vitesse pour avoir une idée de la justesse de l'estimation des temps de parcours. On compare donc deux valeurs de temps de parcours d'un trajet :

1. Estimation du temps de parcours en calculant $T_{end} - T_{start}$ (T_{end} : heure d'arrivée ; T_{start} : heure de départ), il s'agit de la valeur dite « réelle ».
Pour le calcul de $T_{end} - T_{start}$, on s'appuie la base de données « Observations ». L'heure de départ T_{start} correspond à la première valeur donnée au début du trajet. L'heure d'arrivée T_{end} n'est pas directement fournie par les données du répertoire « Observations ». En effet, la dernière valeur donnée pour un trajet correspond à l'heure d'entrée sur le dernier tronçon, ce qui est différent de l'heure de fin de trajet (voir **Figure 23**). C'est pourquoi on calcule T_{end} en ajoutant le temps de parcours estimé sur le dernier tronçon à l'heure d'entrée sur le dernier tronçon (par exemple sur la **Figure 23**, on a $T_{end} = T_5 + t_5$).

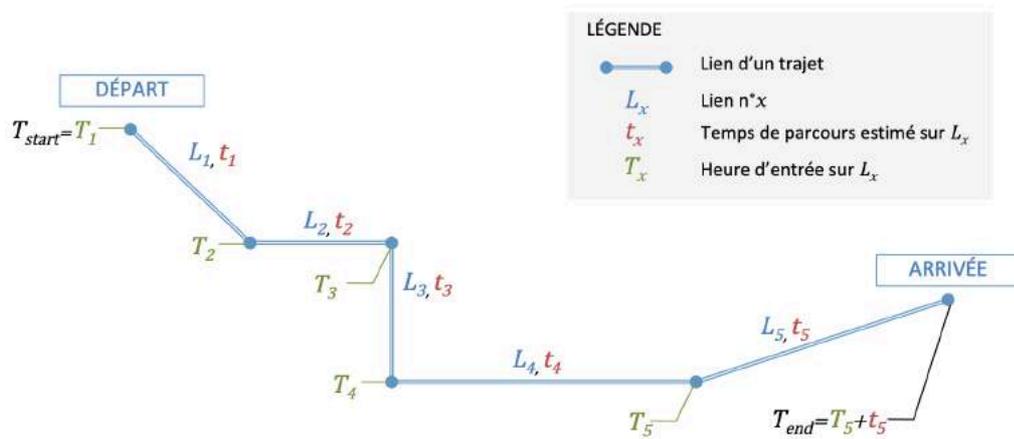


Figure 23 : Trajet d'un véhicule, avec les temps de parcours estimés

2. Estimation du temps de parcours en faisant la somme des petits temps de parcours t_{lien} . Il s'agit de la valeur dite « estimée ». Dans ce cas, il faut veiller à bien considérer l'ensemble des liens de la zone FCD et pas seulement les liens sur les réservoirs. Il est possible que des trajets aient des liens à l'extérieur de la zone d'étude.

Puis, on compare $T_{end} - T_{start}$ à la somme des temps de parcours en calculant l'écart relatif en valeur absolue : $\delta_T = 100 \cdot |T_{end} - T_{start} - \sum_{liens\ du\ trajet} t_{lien}| / |T_{end} - T_{start}|$. Les résultats sont donnés dans la **Figure 24** pour la journée du 5 février 2018.

```
In [183]: FCD_Trips_20180205['abs_deltaT_Percent'].describe()
Out[183]:
count      267613.000000
mean         5.836001
std          8.592973
min           0.000000
25%          1.387197
50%          3.523504
75%          6.800813
max          99.132320
Name: abs_deltaT_Percent, dtype: float64
```

Figure 24 : Statistique de l'erreur relative dans le calcul des temps de parcours pour les trajets du 5 février 2018 (Python)

AU cours de cette journée on comptabilise 267 613 trajets. Le troisième quartile indique une erreur relative de 6,8% : ce qui veut dire que 75% des trajets journaliers ont une erreur d'estimation des temps de parcours inférieure ou égale à 6,8% par rapport à la valeur $T_{end} - T_{start}$ dite « réelle », ce qui est satisfaisant. On a observé qu'une partie des trajets qui ont un $\delta_T > 50\%$ sont des trajets qui font du sur-place.

On peut donc considérer que les valeurs de temps de parcours par tronçon et de distance de parcours par tronçon à partir du jeu de données FCD sont fiables.

Cas du périphérique :

Les MFD du découpage à 10+P réservoir nécessitent un traitement particulier des données du fait qu'on considère le périphérique comme un 11^{ème} réservoir. Seules les données FCD ont bénéficié d'un traitement particulier.

Le réseau des données FCD ne possède pas d'équivalence avec les liens Symuvia. Or il est nécessaire de pouvoir identifier les liens du périphérique dans la base de données FCD. Nous avons donc superposé le réseau Symuvia et le réseau FCD sur le logiciel QGIS, puis sélectionné manuellement les liens correspondant au périphérique. Les données ont été rassemblées dans un document .csv qui bénéficiera également aux travaux de recherche de M. Sepecher. La **Figure 25** montre le résultat de la sélection des liens du périphérique du réseau FCD (en vert) au niveau de la gare de Perrache : on l'a obtenu en comparant le réseau FCD global avec les liens du périphérique du réseau Symuvia (en blanc)



Figure 25 : Capture d'écran du travail de superposition du réseau Symuvia et du réseau FCD pour une équivalence du périphérique au niveau de la gare Perrache.

Conclusion

La préparation des données pour l'estimation MFD a nécessité de s'appropriier les nouvelles données FCD (calcul de vitesse moyenne), et de recensement des nouvelles boucles de comptage dans le réseau. Le périphérique a été le sujet d'une attention particulière notamment dans la définition du périphérique dans le réseau FCD.

Nous allons maintenant étudier les hypothèses de création de deux autres fichiers d'entrée : la description des OD et des routes empruntées (demande) ainsi qu'un fichier des longueurs de parcours par réservoir (offre).

II.2.3 Implémentation de la demande et des longueurs de trajet (offre) avec la matrice Origine-Destination

La **demande** est générée par le modèle à l'échelle d'un nœud et est distribué par une matrice Origine-Destination (OD) grâce à la description de l'ensemble des trajets possibles dans le réseau.

Cette matrice OD permet également d'estimer les longueurs de parcours par réservoir grâce au détail des chemins sur le réseau : on définit alors l'**offre** du réseau.

La matrice OD utilisée dans le modèle est définie à l'échelle macroscopique, c'est-à-dire, à l'échelle des réservoir et donne :

- L'ensemble des **couples Origine-Destination** de réservoir à réservoir. Une origine (resp. une destination) peut être de 2 natures : soit réservoir, ou soit nœud d'entrée (resp. de sortie) du réseau ce qui correspondrait à un véhicule provenant de (resp. allant à) l'extérieur du réseau étudié.
- L'ensemble des **chemins possibles** reliant l'origine à la destination. La **Figure 26** illustre 3 chemins possible pour une paire OD. Chaque chemin est décrit comme une succession de réservoirs

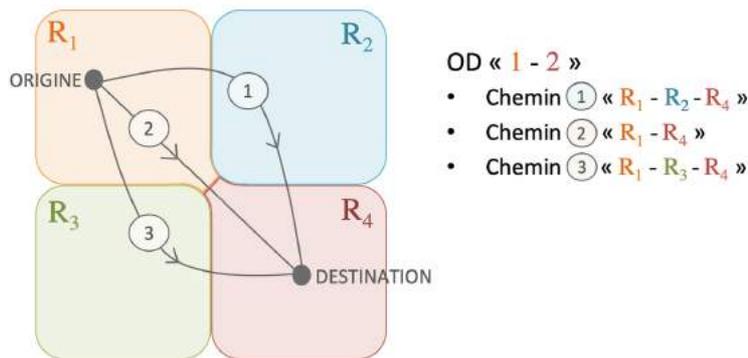


Figure 26 : Exemple d'un couple OD allant du réservoir 1 au réservoir 4 et 3 chemins possibles pour arriver à destination

Un chemin peut être de plusieurs nature (voir **Figure 27**) : chemin traversant le réseau (en orange), chemin interne au réseau (en violet), un chemin venant de l'extérieur vers un réservoir (en vert) et venant d'un réservoir vers l'extérieur (en bleu).

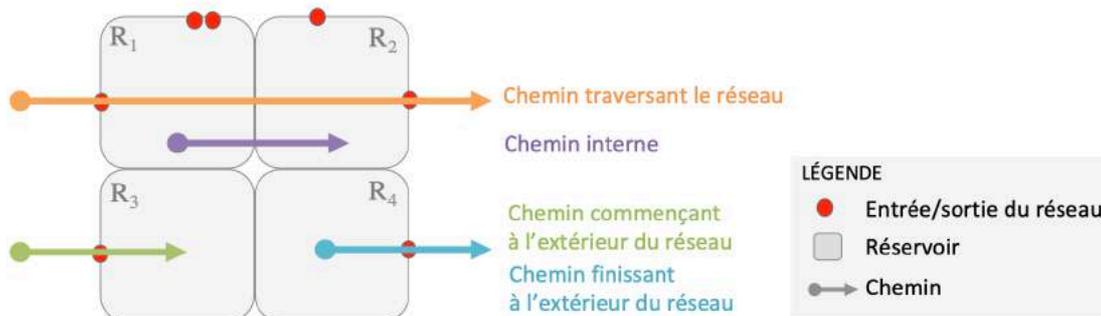


Figure 27 : Nature des chemins dans un réseau

- Le **flux** (en véh/h) par heure par couple Origine-Destination et par chemin déterminé grâce à l'EMD 2015 et qui permet de donner une idée du
- La **longueur de parcours** (en m) par réservoir.

La matrice OD que nous venons de présenter peut être qualifiée de « macro-matrice OD ». En effet, elle ses OD sont de réservoir à réservoir et elle est obtenue en agrégeant une « micro-matrice OD » où les OD sont de zones IRIS à zone IRIS. Nous allons à présent expliquer sous quelle forme se présente la micro-matrice OD et les hypothèses mises en place pour élaborer la « macro-matrice OD ».

II.2.3.1 Matrice OD : données disponibles

La forme de la micro-matrice OD a été fournie et réalisée par Jean Krug, post-doctorant au LICIT. Les données de flux de la micro-matrice OD sont obtenues à partir des informations de l'enquête Ménage-Déplacements de 2015 et le détail des micro-chemins empruntés par Origine-Destination est obtenu avec un algorithme de plus court chemin.

A chaque micro-chemin est associé un ensemble de paramètre :

- L'ensemble des couples OD de zone IRIS à zone IRIS (comme pour la macro-matrice OD, un véhicule venant de l'extérieur passera par un nœud, on considère que son entrée est alors un nœud et non une zone IRIS). Le réseau contient 285 zones IRIS, 53 nœuds d'entrée et de sortie et on répertorie 92 282 couples micro-OD possibles
- L'ensemble des micro-chemins possibles : présentés comme une suite de liens. Un couple OD peut avoir plusieurs chemins possibles : il y a 559 460 micro-chemins possibles. Le couple micro-OD possède au moins un micro-chemin et au plus 9 micro-chemins.
- Un coefficient d'affectation par chemin (entre 0 et 1) qui correspond à la part de flux de l'OD affectée à un chemin

II.2.3.2 Matrice OD : hypothèses et méthode

De nombreuses hypothèses ont été mises en place pour la création de la macro-matrice OD à partir de la micro-matrice OD notamment à cause du très grand nombre de cas particuliers existants dans la micro-matrice OD.

Création de la matrice OD :

- Problème d'incohérence dans le début des chemins :
Les micro-chemins d'IRIS à IRIS sont décrits comme une succession de liens où le premier lien commence à la frontière de la zone IRIS de départ et le dernier lien finit dans le barycentre de la zone IRIS d'arrivée. Les macro-chemins sont définis comme une succession de réservoirs. Or puisque le premier lien débute à la frontière d'un IRIS il est possible qu'un soit assigné à une IRIS voisine d'un réservoir différent : il est possible que le début du macro-chemin ne corresponde pas à l'origine initiale.

Le problème est que deux IRIS voisines n'ont pas toujours le même numéro de réservoir (voir **Figure 28** qui montre tous les départs du réservoir 9 mais qui ont été assignés à un autre réservoir). Il y a donc une correction à ajouter aux macro-chemins en ajoutant le bon réservoir d'Origine.

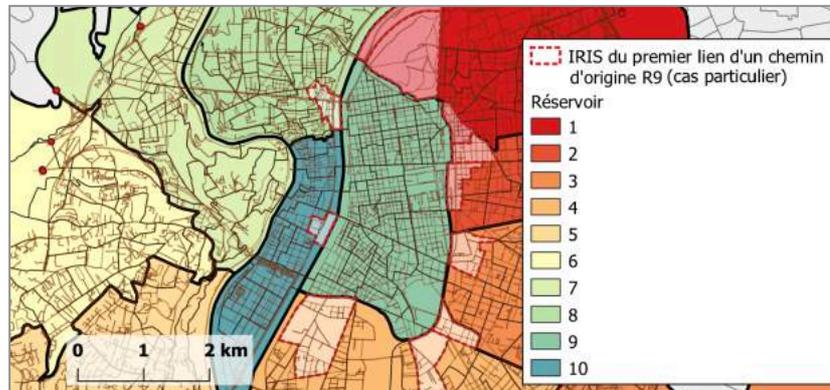


Figure 28 : Cas où un chemin est répertorié comme ayant pour origine le réservoir 9 mais qui a une suite de liens (i.e. un chemin) qui démarre dans des réservoirs voisins (zones entourées en pointillés rouges)

- Cas des liens entre deux zones IRIS :
Pour faire un macro-chemin à partir d'un micro-chemin (succession de liens du réseau), il faut regarder dans quels réservoirs passe chacun de ces liens. Cependant il existe des liens qui sont entre deux zones IRIS (voir les liens en orange sur la **Figure 29**). On considère que si le nœud amont et le nœud aval sont dans deux zones IRIS différentes, alors le lien est entre deux zones IRIS, sinon il est totalement inclus dans une zone IRIS.

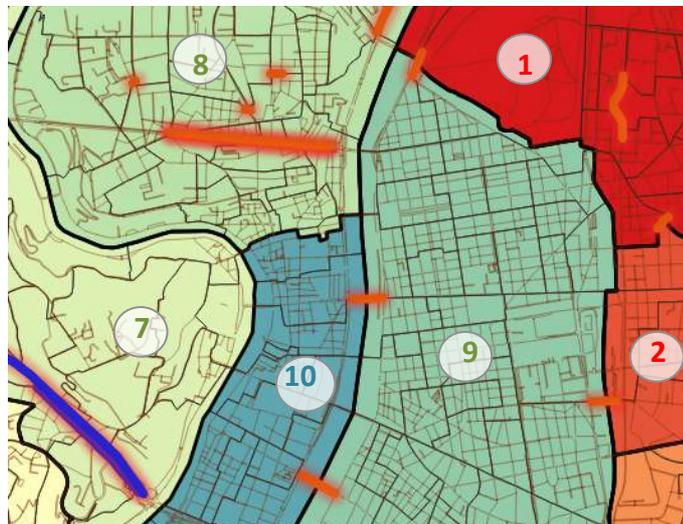


Figure 29 : Liens entre deux zones IRIS (en orange et en bleu) : certains sont entre deux réservoirs et d'autres sont intégralement inclus dans un réservoir

Le cas des liens entre deux zones IRIS soulève deux problèmes dans le cas où le lien n'est pas entièrement inclus dans un unique réservoir, c'est-à-dire si le lien est entre deux réservoirs.

- Cas 1 des liens entre deux réservoirs pour la création des chemins :
Il existe un lien qui possède un nœud amont et un nœud aval dans deux réservoirs différents (respectivement les réservoirs 1 et le 7) et qui traverse un troisième réservoir, à savoir le réservoir 8 (voir **Figure 30**).

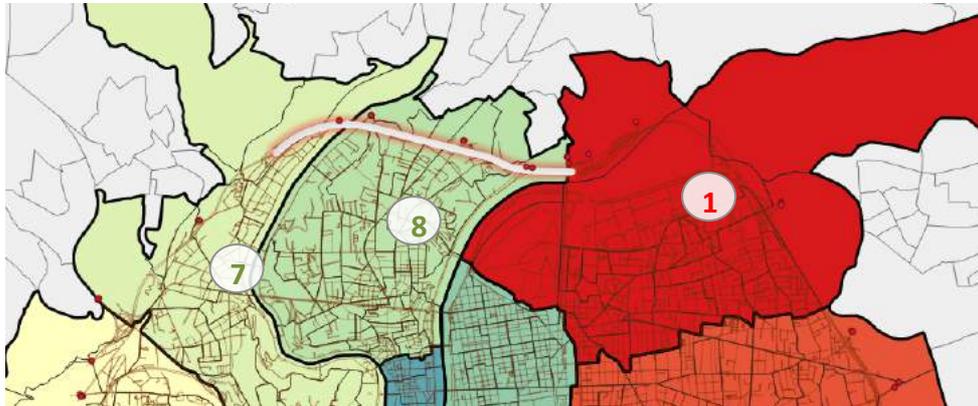


Figure 30 : Lien qui passe par 3 réservoirs en traversant le réservoir 8.

Selon la définition, le chemin passerait directement du réservoir 1 au réservoir 7 ; or cela pose un problème de continuité dans les chemins. En effet, il n'existe pas de frontière réelle commune entre le réservoir 7 et le réservoir 1 : il est impossible de faire cet enchaînement de réservoir. La question qui se pose est la suivante : faut-il considérer que les chemins passe successivement dans les réservoirs 1, 8 puis 7 ou qu'il va du réservoir 1 au 7 ? En analysant ce cas de plus près, on s'aperçoit que ce lien en réalité d'un tunnel du périphérique. Cela implique qu'une voiture entrant en amont de ce lien ressortira nécessairement à la fin de ce lien sans dévier de sa trajectoire, i.e. le flux entrant est égal au flux sortant sans perte. Deux choix de modélisation s'offrent à nous :

- Soit on considère que le chemin passe par le réservoir 8, mais ce ne serait pas une représentation réaliste de la demande dans ce réservoir
- Soit, le modèle prévoit un nœud fictif permettant aux véhicules de circuler du réservoir 1 au réservoir 7.

C'est la deuxième option qui a été choisie dans le modèle de trafic : il existe une frontière fictive entre le réservoir 1 et 7 permettant de passer d'un réservoir à un autre par le tunnel du périphérique.

- Cas 2 des liens entre deux réservoirs pour le calcul de la longueur par réservoir. La longueur parcourue dans chaque réservoir est la somme des longueurs de liens empruntés dans ce réservoir. Or si un lien se situe entre deux réservoirs : quelle longueur est affectée à chaque réservoir ? Il a été choisi arbitrairement que si un véhicule emprunte ce lien alors il parcourt la moitié dans un réservoir et l'autre moitié dans l'autre réservoir.
- Cas des chemins qui passent plusieurs fois dans un réservoir.
Il n'est pas rare d'avoir des chemins qui oscillent entre deux réservoirs. Cela vient du fait que certaines zones IRIS sont délimitées selon des frontières géographiques telles que les grands axes routiers. Ainsi, il est fréquent qu'un véhicule emprunte une route au niveau de la frontière et que son trajet soit considéré tantôt dans un réservoir, tantôt dans l'autre.

Ce type de trajet n'a pas été corrigé car il fera l'objet d'un traitement particulier dans le modèle MFD, à l'exception des cas où il s'agit du réservoir du périphérique. Dans ce cas, il semble peu réaliste qu'un véhicule sorte du périphérique pour y revenir comme dans cet exemple en **Figure 31**. La Figure représente un chemin empruntant une partie du périphérique (en bleu) et une partie du réseau non-périphérique (en blanc). Ce type de comportement semble absurde et dans ce cas-là, le chemin est retravaillé pour éviter ce type de situation.

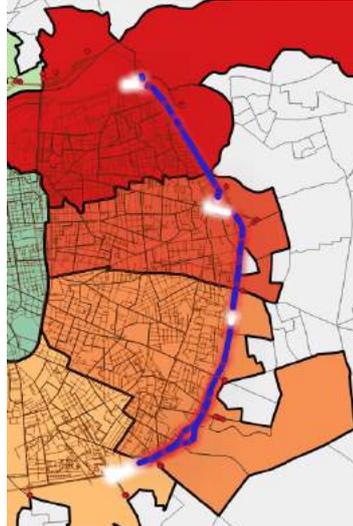


Figure 31 : Exemple d'un chemin passant par le périphérique et sortant régulièrement de celui-ci

La question qui se pose est de savoir à partir de quelle longueur-seuil on considère que le chemin de type « Périphérique – Réservoir – Périphérique » devient un chemin uniquement « Périphérique ». Pour cela, la longueur du chemin entre deux apparitions du périphérique a été calculée puis affichée. La **Figure 32** montre 3 pics de longueur distincts :

- pic entre 0 et 750m
- pic à 3000m
- pic à 3500m

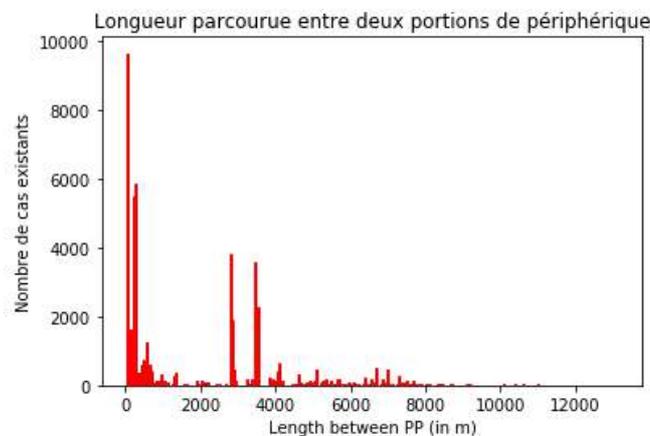


Figure 32 : Longueur de chemin entre deux portions de périphérique

Le seuil choisi est de 1000m. Ainsi, dans le cas des chemins qui passent par le périphérique, si un chemin a une succession « Périphérique – Réservoir – Périphérique » et que la longueur parcourue sur le réservoir est inférieure à 1000m, alors le chemin est transformé en un chemin uniquement « Périphérique » où la longueur parcourue comprend celle du Réservoir.

Critère de choix sur les macro-chemins :

Le modèle de trafic pourrait avoir du mal à gérer le cas des chemins qui oscille entre deux réservoirs *Rés1* et *Rés2*. Par exemple une succession de « *Rés1* – *Rés2* – *Rés1* » imposerait un trajet du réservoir 1 au réservoir 2 alors qu'en réalité le véhicule a simplement emprunté un tronçon *Rés2* à la frontière entre *Rés1* et *Rés2*. Les chemins engendrés dans le simulateur serait alors biaisé. C'est pourquoi par souci de simplification, on a décidé de supprimer tous les chemins qui passaient deux fois par le même réservoir.

Répartition des flux :

A chaque réservoir est donnée une demande (nombre de véhicules au cours de la journée). Cette demande doit être répartie entre chaque macro-chemin, sachant que le modèle impose 3 macro-chemins possibles par OD. Le nombre de flux à répartir est considérable, par exemple pour un découpage en 10 réservoirs, il y a 385 paires OD et au maximum 992 routes.

Pour la simulation, on a utilisé la même répartition de flux en 2018 que celle estimée en 2011. En effet, il est compliqué d'estimer la distribution de flux et il n'existe pas de méthode toute faite. C'est pourquoi, dans un souci de simplification, on a repris la répartition des flux de la simulation 2011 pour la simulation 2018.

Conclusion

A partir de la matrice OD et de ces hypothèses on obtient la demande de trafic au cours d'une journée et la longueur parcourue dans les réservoirs pour chaque couple Origine-Destination nécessaires pour le simulateur MFD.

Le travail de pré-traitement des données d'entrée du simulateur MFD constitue une étape importante de la simulation de trafic. Les hypothèses mises en place sont d'autant plus nombreuses qu'elles sont une façon de modéliser le trafic.

L'exploitation du modèle de trafic est la première étape de calcul du modèle couplé trafic-émission. En effet, la sortie du modèle de trafic fournit des informations nécessaires au calcul des émissions. L'estimation des émissions s'appuie sur une base de données COPERT et sur une description du parc de véhicules. Ces estimations d'émission seront finalement comparées à une base de données d'émissions issue d'un observatoire d'émissions (ATMO Auvergne RhôneAlpes). Nous allons détailler l'ensemble de ces données dans la partie qui suit.

II.3 L'estimation des émissions associées

Le calcul des émissions de polluants s'appuie sur les courbes de facteur d'émission FE de COPERT V (Cf Chapitre 1 §1.2.3).

Une des méthodes de calcul consiste à considérer que les vitesses moyennes et l'accumulation sont données pour un parc roulant moyen composé de VP, VUL, VL et de bus. Pour cela, on utilise un FE de parc moyen, et dans ce cas, les émissions de polluants par réservoir sont données par la formule $E_{res} = D_{parc\ moyen, res} FE_{parc\ moyen}(\bar{v})$. Une seconde méthode consiste à supposer que le modèle de trafic ne considère que les véhicules légers (VP et VUL), et que les sorties du modèle de trafic caractérisent donc les VP et VUL. Dans le calcul des émissions, il faut alors ajouter les véhicules lourds (PL et bus). Dans ce cas, les émissions sont calculées avec la formule suivante, en s'appuyant sur les données sur la composition du parc :

$$E_{res} = \underbrace{D_{VLégers, rés} FE_{VLégers}(\bar{v}_{VLégers, rés})}_{\text{Véhicules légers (VP et VUL)}} + \underbrace{D_{VLourds, rés} FE_{VLourds}(\bar{v}_{VLourds, rés})}_{\text{Véhicules lourds (PL et bus)}}$$

avec $D_{XX, rés}$ la distance parcourue dans le réservoir et $v_{XX, rés}$ la vitesse moyenne de parcours dans le réservoir pour le véhicule XX

Enfin, la simulation couplée trafic-émission fournit des valeurs d'émissions pour le CO_2 , les NO_x et les PM_{10} , par réservoir et par heure. Ces valeurs pourront être comparées avec des cadastres d'émissions fournis par ATMO Auvergne-Rhône-Alpes sur la même période de simulation. C'est une façon de vérifier la pertinence des résultats de simulation.

Finalement, trois jeux de données sont utilisés pour les estimations de polluants, à savoir :

1. Les courbes de facteur d'émission de COPERT V pour le calcul des émissions
2. La composition du parc national en 2018 pour le calcul des émissions
3. Les émissions de polluants pour vérifier les résultats du modèle couplé

La **Figure 33** illustre l'utilisation de ces données dans la méthode d'estimation des polluants :

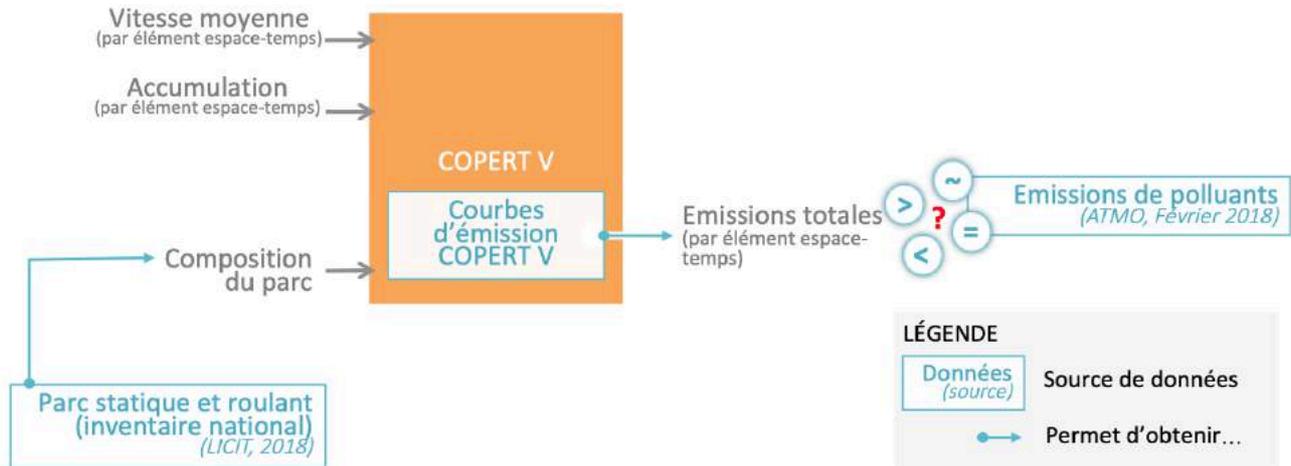


Figure 33 : Les données utilisées pour l'estimation des émissions de polluants et comparaison

II.3.1 Emissions : données disponibles

Emissions de polluants sur février 2018 (ATMO Auvergne-Rhône-Alpes) :

ATMO Auvergne-Rhône-Alpes est l'observatoire agréé par le Ministère de la Transition écologique et solidaire, pour la surveillance et l'information sur la qualité de l'air en Auvergne-Rhône-Alpes.

ATMO dispose d'une base de données d'émissions des polluants NO_x, CO₂ et PM₁₀ sur le mois de Février 2018 que nous possédons. Les données d'émissions mensuelles de polluants sont fournies pour chaque lien du réseau ATMO (voir **Figure 34** : réseau ATMO en vert). Une deuxième base de données complémentaire permet de calculer les émissions de ces liens sur une heure : il s'agit d'un coefficient horaire global pour tous les jours du mois de février. Pour obtenir la valeur d'émission horaire sur un lien, il faut donc multiplier le coefficient horaire global par l'émission mensuelle du lien.

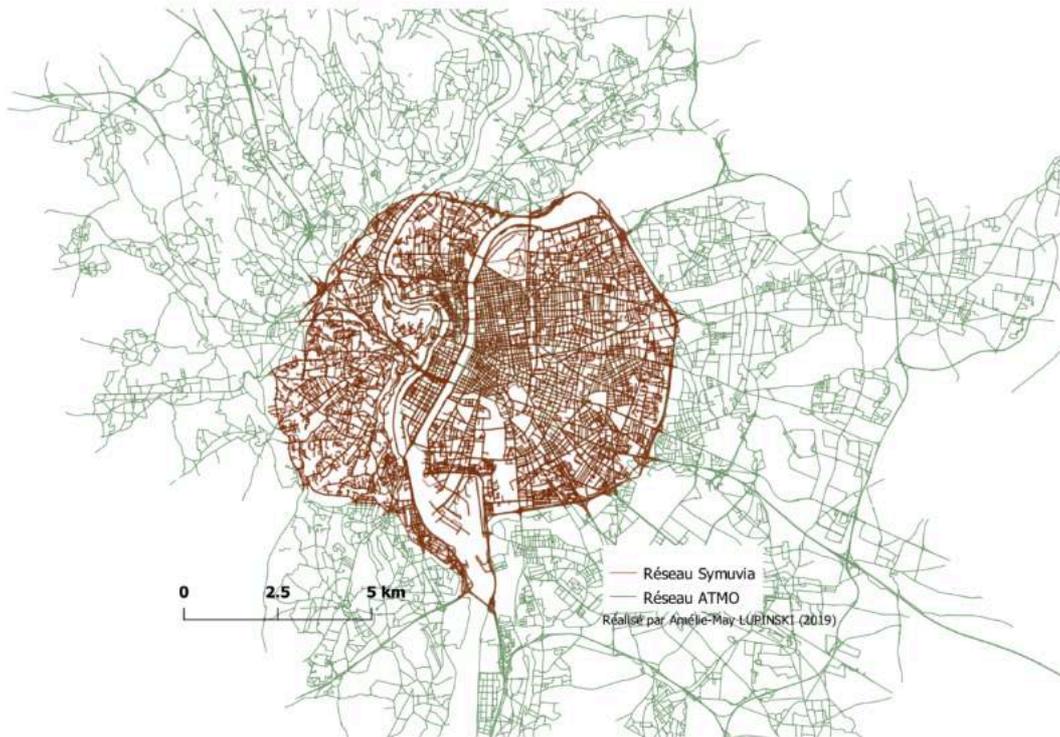


Figure 34 : Carte du réseau ATMO où sont évaluées les émissions de polluants sur la zone urbaine de Lyon.

Les données fournies par ATMO sont issues de modèles de prévisions et d'une réactualisation bi-journalière des données avec des valeurs réelles. Les modèles de prévisions prennent en compte de nombreux facteurs dont la localisation des sources de polluants, la topographie, les prévisions météorologiques, les conditions de dispersion atmosphérique, les niveaux de polluants de la veille et des analyses statistiques basées sur des données de plusieurs années. Ces valeurs issues du modèle sont ensuite « validées et ajustées quotidiennement par des experts en prévision de qualité de l'air. Elles fournissent des prévisions de la pollution atmosphérique en tout point du territoire » d'après ATMO. Ainsi les données sont calculées une première fois dans la journée puis réactualisées à 14h et 00h en prenant en compte un ensemble de données observées sur les stations de mesures.

Au vu de la méthodologie d'ATMO pour le cadastre des émissions de polluants, on peut considérer que les données fournies sont un point de repère pour la comparaison mais elles ne constituent aucunement une référence au même titre que des mesures réelles observées.

Description du parc :

Une description du parc routier nous est fournie par le CITEPA. Il s'agit d'un inventaire national des parcs statique et roulant pour COPERT établi en 2018 et projeté en 2020¹.

En 2018, les parcs statique et roulant sont composés à :

- 72,3% de VP
- 21,1% de VUL
- 1,1% de bus
- 5,5% de PL

¹ Parcs prospectifs statique et roulant : MTES-DGEC/CITEPA version Janvier 2019 (scénario AME-2018)

Courbes de facteur d'émission COPERT V

On possède les courbes de facteur d'émission COPERT V pour les VP, les VUL, les PL, les Bus et pour un parc moyen donné. Pour chacun des types de véhicule, on possède les courbes de *FE* (en kg/km) en fonction de la vitesse (en km/h) pour 7 polluants différents. Mais seules les courbes de CO₂, NO_x et PM₁₀ seront utilisées pour l'étude. La vitesse est une valeur entière comprise entre 1 et 120 km/h.

La **Figure 35** ci-dessous représente les facteurs d'émissions COPERT V pour les VP, les VUL, les PL, les bus, et pour un parc moyen de véhicules.

Les véhicules qui polluent le plus, quelque soit le polluant sont les véhicules lourds, à savoir les PL (courbes en violet) et les bus (courbes en vert). D'autre part, pour les émissions de CO₂ et de NO_x, la courbe du facteur d'émission diminue en fonction de la vitesse : les véhicules émettent de moins en moins de polluants au fur et à mesure que la vitesse augmente. Tandis que pour les émissions de PM₁₀, les VUL ont une courbe d'émission qui diminue entre 0 à 60km/h puis qui augmente après 60km/h : ils émettent plus à vitesse élevée. De même pour les PL et les VP pour les émissions de PM₁₀.

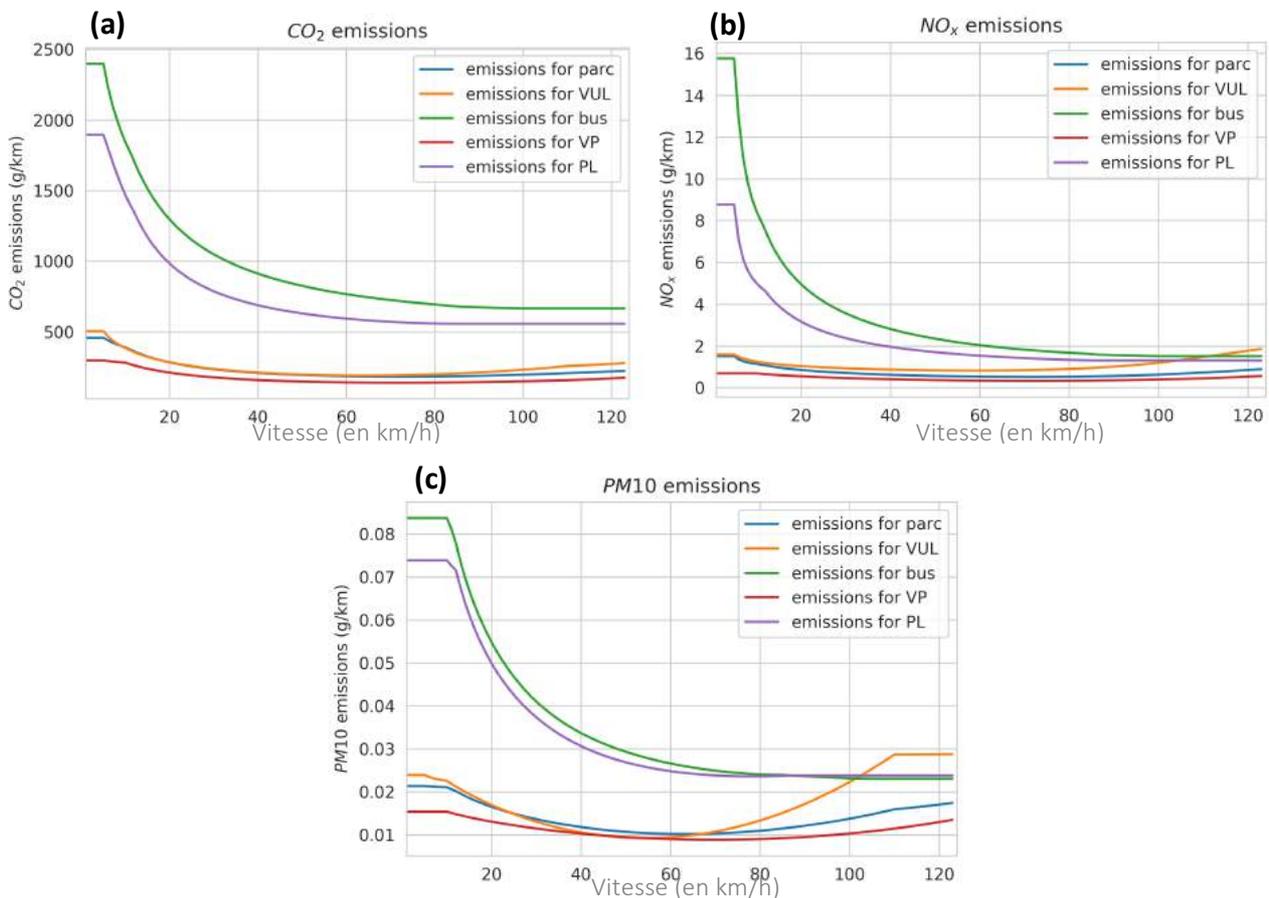


Figure 35 : Courbe d'émission de COPERT V pour les VP, VUL, bus, PL et un parc moyen pour (a) le CO₂ ; (b) les NO_x ; (c) le PM₁₀

II.3.2 Emissions : hypothèses et méthode

Critère spatial :

ATMO évalue les émissions de polluants à l'échelle de chaque lien d'un réseau. Pour comparer cette base de données ATMO aux émissions évaluées avec le modèle couplé, il faut avoir la même échelle de comparaison avec des réseaux comparables. C'est pourquoi pour la suite de l'étude, on ne conserve qu'une partie des liens du réseau ATMO (**Figure 36**).

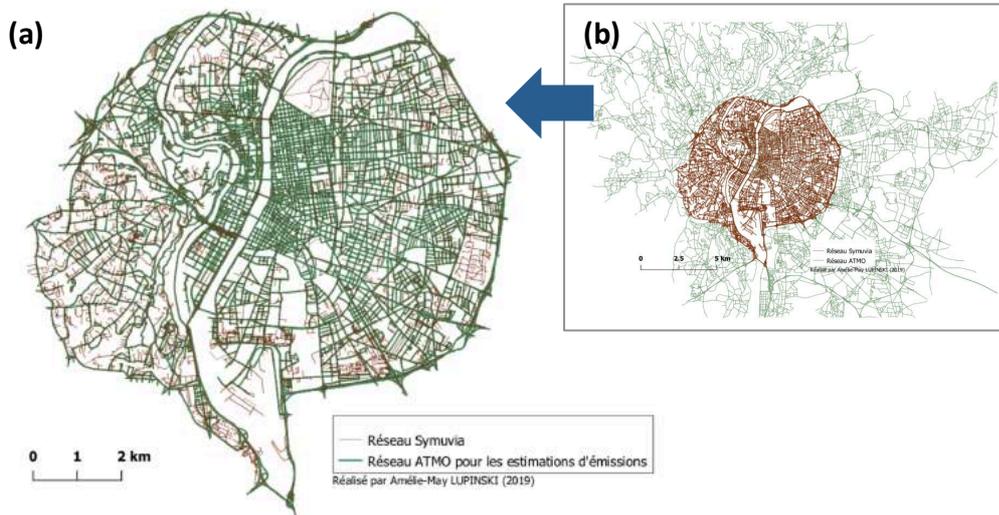


Figure 36 : Réseau Symuvia en rouge et réseau ATMO en vert : (a) le réseau ATMO sélectionné pour l'étude ; (b) réseau ATMO initial

Variables associées aux véhicules lourds dans la 2^{ème} méthode de calcul :

Pour le calcul des émissions impliquant la distinction des véhicules légers et des véhicules lourds, on suppose que les véhicules lourds ont une vitesse moyenne $\overline{v}_{simu,rés}$ et une distance $D_{simu,rés}$ identique à celle trouvée dans la simulation de trafic. D'où la formule des émissions :

$$E_{rés} = \overbrace{D_{VLégers,rés} FE_{VLégers}(\overline{v}_{VLégers,rés})}^{\text{Véhicules légers (VP et VUL)}} + \overbrace{D_{VLourds,rés} FE_{VLourds}(\overline{v}_{VLourds,rés})}^{\text{Véhicules lourds (PL et bus)}}$$

$$= D_{simu,rés} FE_{VP+VUL}(\overline{v}_{simu,rés}) + \alpha \times D_{simu,rés} FE_{bus+PL}(\overline{v}_{simu,rés})$$

avec $D_{simu,rés}$ et $\overline{v}_{simu,rés}$ la distance et la vitesse moyenne dans le réservoir et $\alpha = 7/93$ d'après la description du parc.

Conclusion

Suite à une phase de pré-traitement, les données pour une simulation couplée trafic-émission sont ainsi disponibles sur la base de données 2018 et appliquées à deux découpages (10 réservoirs et 10+P réservoirs).

Chapitre 3 :

Résultat des simulations

Dans le chapitre 1, nous avons présenté le fonctionnement du modèle couplé trafic-émissions. Dans le chapitre 2, nous avons développé les différentes étapes de préparation des données d'entrée, à la fois pour le trafic mais également pour les émissions. Nous allons maintenant voir quels sont les résultats de la simulation trafic-émissions.

Le modèle couplé trafic-émissions fournit des valeurs d'émissions pour le CO₂, les NO_x et les PM₁₀, par réservoir et par heure. L'objectif de cette étude est de **mesurer la pertinence de cette approche pour l'évaluation environnementale**, à savoir si le modèle couplé trafic-émissions fournit des résultats rapides et au plus proche de la réalité. Pour cela, les résultats d'émission seront comparés aux données d'ATMO Auvergne-Rhône Alpes.

D'autre part, une discussion sur le calibrage et de découpage spatial viendront compléter l'analyse du modèle. **Dans quelle mesure les paramètres de découpage spatial (10 et 10+P réservoirs) et de calibrage (données 2011 et 2018) ont-ils un impact sur les courbes d'émission estimées par le modèle couplé trafic-émissions ?** Par manque de temps, toutes les simulations à 10+P réservoirs n'ont pu être finalisées, bien que le pré-traitement des données brutes 2018 ait été réalisé et que les données d'entrée 2018 du modèle de trafic soient prêtes. Il ne sera pas possible de mesurer l'influence de la séparation du périphérique au reste du réseau comme un 11^{ème} réservoir. Néanmoins, il nous sera possible de confronter les MFD pour ce découpage.

III.1 Estimation des MFD : quelle(s) différence(s) ?

L'estimation des MFD est une étape-clé du fonctionnement modèle de trafic. On rappelle qu'un MFD permet de calibrer l'offre sur un réservoir : il permet notamment de caractériser les états de trafic en fonction des valeurs de production et d'accumulation. Les MFD ont été calculés sur un réseau de catégories 1 à 4. Il constitue la clef de voûte du modèle de simulation de trafic, le MFD représente l'offre et le comportement des usagers sur les routes (choix de certains chemins).

III.1.1 10 réservoirs : MFD 2011 et MFD 2018

Nous allons évaluer l'impact du calibrage sur l'estimation du MFD en comparant les MFD 2011 et 2018 d'un découpage en 10 réservoirs. Dans les deux cas, les points du MFD représentent la production en fonction de l'accumulation avec un pas de temps de 18 minutes sur une semaine ouvrée. Nous allons analyser d'un peu plus près les paramètres d'entrée pour l'estimation de chacun des deux MFD.

Le MFD 2011 a été calculé à partir de données boucles du Grand Lyon et de données GPS de taxi sur une semaine ouvrée le lundi 20 et le vendredi 25 février 2011. Le MFD 2018 a également été calculé à partir des données boucles du Grand Lyon. En revanche, les données GPS utilisées sont des données de FCD fournies par Médiamobile. L'estimation du MFD se fait sur la 1^{ère} semaine du février pour les jours entre le lundi 5 au vendredi 9 février 2018. Les résultats des MFD sont donnés en **Annexe 1** page 88. Quelles sont les différences entre les deux MFD ?

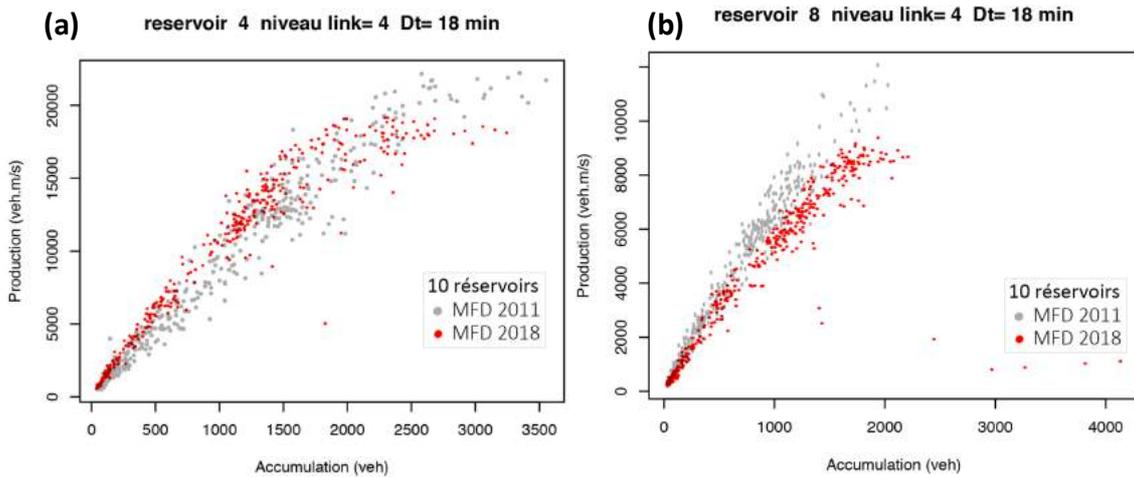


Figure 37 : Comparaison des MFD 2011 (en gris) et MFD 2018 (en rouge) avec deux cas de figure : (a) le MFD 2018 est au dessus du MFD 2011 (b) le MFD 2018 est en dessous du MFD 2011

Les MFD 2011 et 2018 sont bien définis. Il existe deux cas de figure :

- Pour les réservoirs 1 à 5, les MFD 2018 sont au-dessus des MFD 2011 comme on peut le voir sur la **Figure 37.a**. Cela se traduit par une pente plus élevée pour les MFD 2018, c'est-à-dire que la vitesse de circulation en régime fluide est plus grande en 2018 qu'en 2011 dans ces réservoirs. Par exemple dans le réservoir 1, la pente du MFD 2018 est d'environ 15m/s contre 12m/s en 2011.
- Pour les réservoirs 6 à 10, c'est l'inverse (voir **Figure 37.b**) : les MFD 2011 sont au-dessus des MFD 2018.

Enfin, on peut remarquer la production maximale des MFD 2018 est plus faible que celle des MFD 2011. La valeur de la production maximale sur un MFD caractérise la capacité à l'échelle de ce réservoir.

Les résultats de 2018 sont moins dispersés, cela peut s'expliquer par le fait que les données 2018 sont plus riches, on dispose de plus de données pour générer les MFD 2018 par rapport aux données 2011. Cela permet d'avoir une pente de vitesse plus précise.

Ici, les résultats indiquent donc que la capacité des réseaux de la zone urbaine de Lyon a diminué entre 2011 et 2018. La chute de capacité n'a pas d'explication précise à ce jour : elle peut être due aux nouveaux aménagements de voirie (par exemple l'aménagement sur le cours Lafayette), ou à un nouveau comportement des usagers.

III.1.2 MFD 2018 : 10 réservoirs et 10+P réservoirs

Nous allons maintenant étudier les différences entre les deux découpages spatiaux concernant l'estimation du MFD en comparant leur MFD. Dans les deux cas, les points du MFD représentent la production en fonction de l'accumulation avec un pas de temps de 18 minutes sur la semaine ouvrée du lundi 5 février au vendredi 9 février 2018. De même, la production et l'accumulation sont calculées à partir des données boucles de la métropole de Lyon et des données FCD. Les résultats des MFD sont donnés en **Annexe 2** page 90.

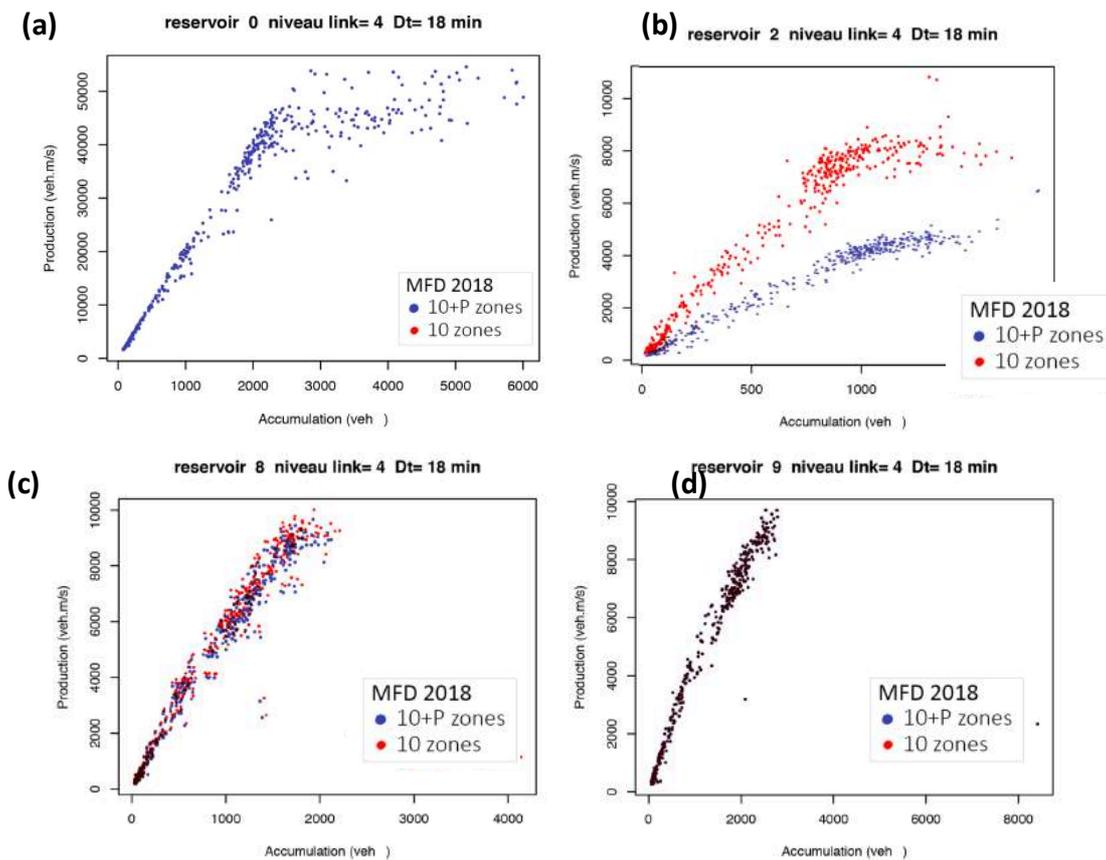


Figure 38 : Comparaison entre les MFD 2018 d'un découpage en 10 et d'un 10+P réservoirs avec (a) le MFD du périphérique tout seul ; (b) le MFD 10 réservoirs est au dessus du MFD 10+P réservoirs ; (c) et (d) le MFD 10 réservoirs est confondu avec le MFD 10+P réservoirs

Le MFD du périphérique est bien défini, comme on peut le voir sur la **Figure 38.a**. Les points sont peu dispersés : il est donc possible d'estimer facilement la pente du MFD en régime fluide. Ainsi, la pente est de 20m/s, soit environ 70km/h, c'est-à-dire qu'en régime fluide, les véhicules circulent à 70km/h.

Pour les réservoirs de 1 à 10, on peut observer 2 cas de figure

- Réservoirs 8 et 9 (**Figures 38.c** et **38.d**): le MFD 10 réservoirs est identique au MFD 10+P
- Tous les autres réservoirs (**Figure 38.b**) : le MFD 10 réservoirs est plus bas avec une pente plus faible.

Ceci s'explique assez bien. On peut remarquer que le seul réservoir à ne pas avoir de lien de périphérique quel que soit le découpage est le réservoir 9 : son MFD 10 réservoirs et son MFD 10+P sont confondus. Il en est de même pour le réservoir 8 qui ne possède en réalité qu'un seul et unique tunnel, soit un seul et unique lien de périphérique (il s'agit d'un tunnel) d'où le léger décalage entre les MFD du réservoir 8.

Conclusion

La corrélation entre la présence ou non de liens du périphérique dans le réservoir semble évidente : la présence du périphérique dans un réservoir augmente la pente et la capacité des MFD.

III.2 Résultats de simulation MFD entre 2011 et 2018 (10 réservoirs)

Nous avons réalisé une simulation MFD pour un découpage à 10 réservoirs pour les années 2011 et 2018. Les résultats de cette simulation donnent l'accumulation (en véh) et la vitesse moyenne (m/s) par réservoir pour chaque pas de temps D_T de 18 min. On rappelle que la répartition des flux entre les deux simulations est la même.

Les résultats des simulations MFD serviront directement dans le calcul des émissions de polluants. Nous allons regarder dans quelle mesure l'accumulation et la vitesse sont différentes entre les simulations 2011 et 2018.

III.2.1 Sortie de la simulation : l'accumulation et la vitesse moyenne dans les réservoirs

L'accumulation par réservoir

La **Figure 39** ci-dessous donne l'évolution de l'accumulation pour la simulation 2018 avec en gras la courbe obtenue avec la simulation et en gris les valeurs empiriques précédemment recueillies pour le MFD. Les valeurs d'accumulation sont surestimées dans le réservoir 9 (au centre du réseau routier) et le pic du matin est sous-estimé sur les autres réservoirs.

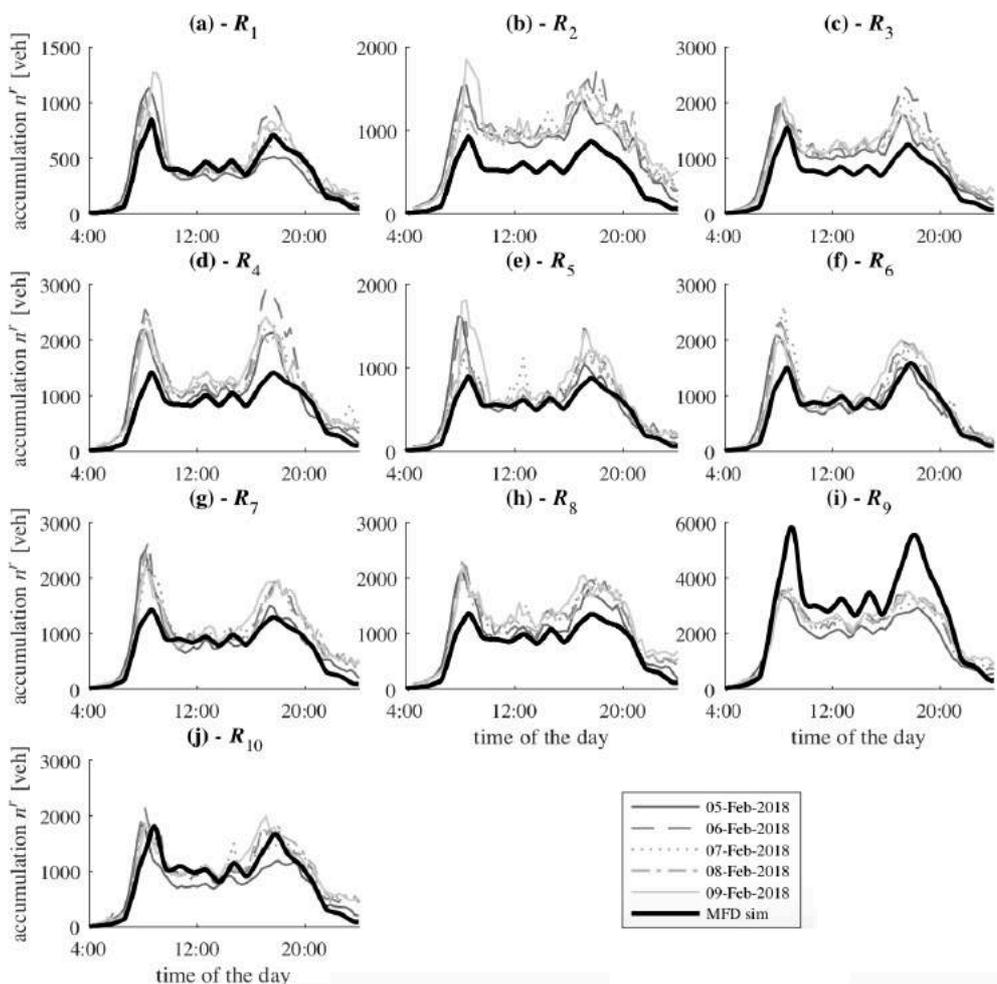


Figure 39 : Evolution de l'accumulation (en véh) par réservoir au cours de la journée pour un découpage en 10 réservoirs à l'année 2018 avec les données de la simulation 2018 (en gras) et des données empiriques 2018 (en gris)

L'allure des courbes de simulation 2011 et 2018 possède deux pics : un le matin à 8h-9h et un le soir vers 17h-18h (courbes de la simulation 2011 disponibles en **Annexe 3** page 92). Les courbes de simulation 2011 se rapprochent assez bien des données empiriques bien qu'elles soient sous-estimées.

En comparant le résultat des deux simulations, on observe 3 cas de figure (la figure complète de la comparaison entre les deux simulation se trouve en **Annexe 4** page 93) :

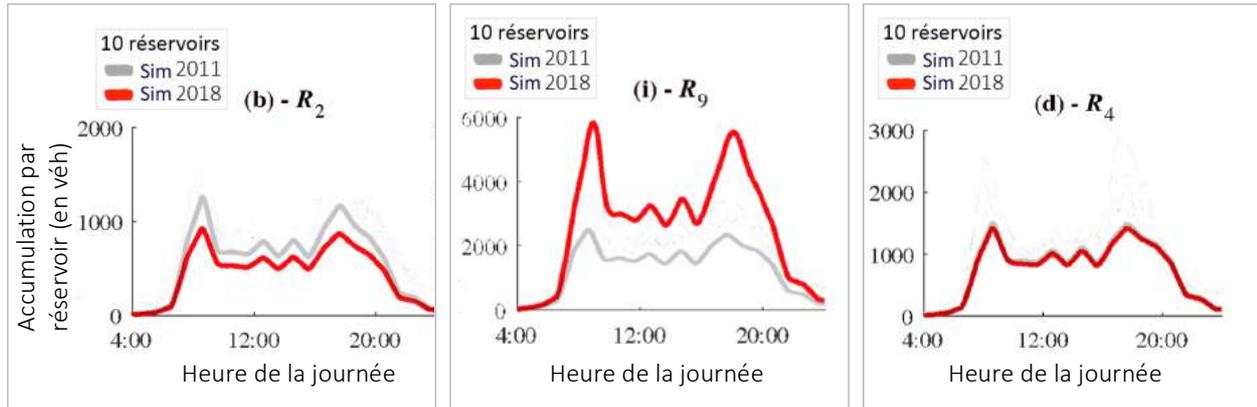


Figure 40 : Evolution de l'accumulation (en véh) par réservoir au cours de la journée pour un découpage en 10 réservoirs : courbes des réservoirs 2, 9 et 4 pour la simulation 2011 (en gris) et la simulation 2018 (en rouge)

Ainsi, trois cas de figure sont observables :

- Pour les réservoirs 2 et 3, $Acc_{2018} < Acc_{2011}$ (**Figure 40 (b) - R₂**)
- Pour les réservoirs 5, 6, 8, 9 et 10 : $Acc_{2018} > Acc_{2011}$ (**Figure 40 (i) - R₉**). Dans ce cas précis, le plus gros écart est attribué au réservoir 9 où il y a un pic du matin et du soir près de 1,5 fois plus grand en Simulation 2018
- Pour les autres réservoirs, les 1, 4, 7 : les courbes d'accumulation sont similaires entre les deux années (**Figure 40 (d) - R₄**)

La vitesse moyenne par réservoir :

La vitesse moyenne est un bon indicateur de la présence de congestion dans un réservoir. La **Figure 41** ci-dessous illustre les courbes de vitesse moyenne (en m/s) par réservoir pour une simulation 10 réservoirs pour la simulation 2018 (en gras rouge) en comparaison avec les données de vitesse empiriques calculées avec les FCD (en gris) et la simulation 2011 (en gras noir).

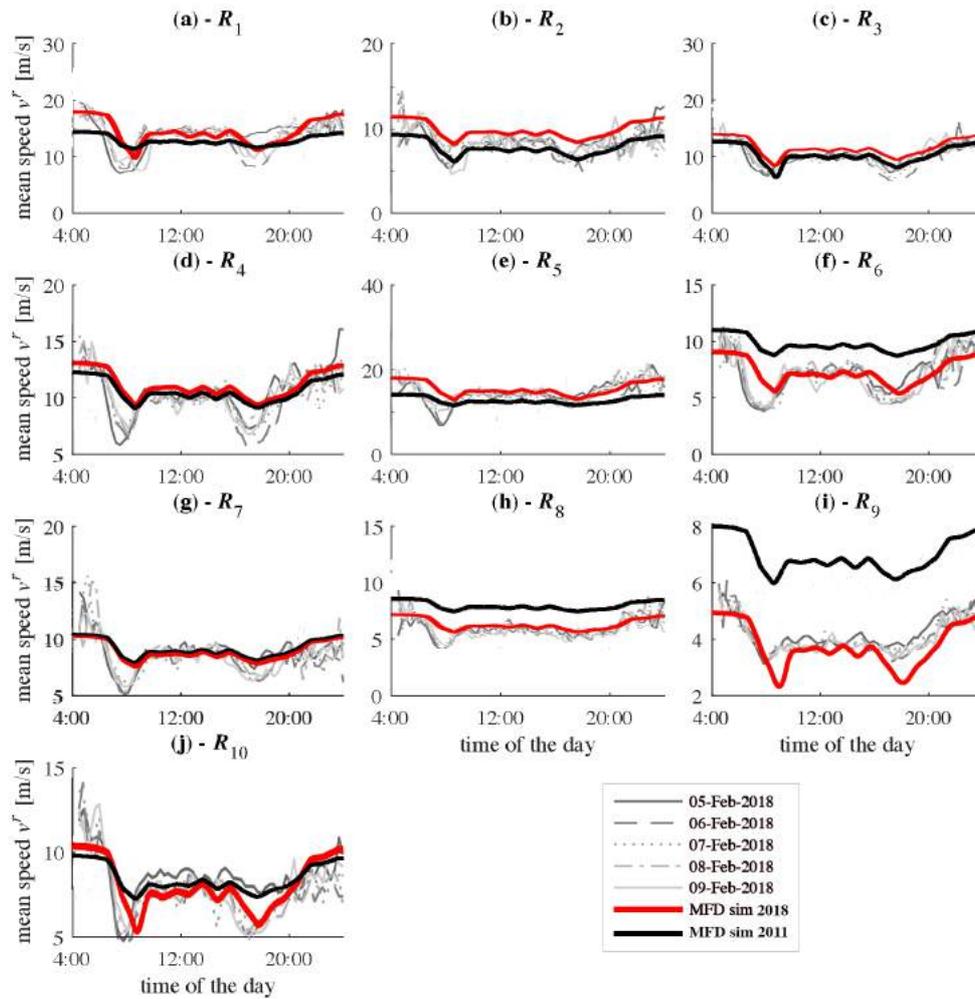


Figure 41 : Evolution de la vitesse moyenne (en m/s) par réservoir au cours d'une journée pour la simulation 2011 (gras noir), la simulation 2018 (gras rouge) et les données empiriques de 2018 (en gris)

Les résultats de la simulation 2011 et les données empiriques de 2011 sont disponibles en **Annexe 5** page 94.

Pour les simulations 2011 et 2018, on peut observer deux pics négatifs de vitesse le matin et l'après-midi. Ils correspondent aux affluences de trafic sur le territoire qui se traduit par une augmentation du nombre de véhicules sur les réservoirs et une baisse de la vitesse moyenne pratiquée. Les profils de vitesse peuvent être rassemblés dans 3 catégories :

- D'une part, dans les réservoirs 1, 4 et 5, la vitesse moyenne par réservoir dépasse les 10m/s = 36km/h allant même jusqu'à 15m/s = 54km/h dans les réservoirs 1 et 5.
- Au contraire, dans le réservoir 9, les véhicules circulent à une vitesse moyenne de 7m/s = 25km/h dans la simulation 2011 et à 15km/h dans la simulation 2018.
- Dans les autres réservoirs, la vitesse avoisine les 10m/s = 36km/h.

Comparativement entre les deux simulations on a :

- Dans 4 réservoirs sur 10 (R_1, R_2, R_3, R_5), $\overline{v_{sim2018}} > \overline{v_{sim2011}}$.
- Dans 4 autres réservoirs sur 10 (R_6, R_8, R_9, R_{10}), $\overline{v_{sim2018}} < \overline{v_{sim2011}}$, avec un écart de 3 m/s \approx 11 km/h dans le réservoir 9, ce qui représente environ 50% de la vitesse de la Simulation 2011 à midi.
- Dans les réservoirs 4 et 7, les vitesses moyennes sont identiques dans les deux simulations

Conclusion

La vitesse moyenne par réservoir entre les deux simulations a un écart de plus de 7km/h dans les réservoirs 8, 6 et 9 tout au long de la journée. Dans le réservoir 10, les pics d'affluence sont particulièrement marqués.

Les valeurs d'accumulation et de vitesse moyenne par réservoir servent à calculer la distance parcourue par réservoir, utile pour le calcul des émissions dans l'équation $E_{res} = D_{res}FE(\overline{v_{res}})$ où $D_{res} = Accumulation_{rés} \times \overline{v_{rés}} \times Delta_T$.

III.2.2 Distance parcourue par réservoir

La distance parcourue par réservoir est calculée avec la formule $Acc_{rés} \times \overline{v_{rés}} \times Delta_T$ où le pas de temps de simulation $Delta_T$ est de 30 secondes.

La **Figure 42** ci-dessous représente la distance parcourue par réservoir pendant 1h dans les simulations 2011 et 2018. Le profil des distances parcourues est la même entre les réservoirs. De plus, on peut remarquer que l'ordre des réservoirs est conservé entre les deux simulations : la plus grande distance parcourue est dans le réservoir 9 (au centre du réseau) et la distance parcourue la plus basse est dans le réservoir 2 (à l'est du réseau).

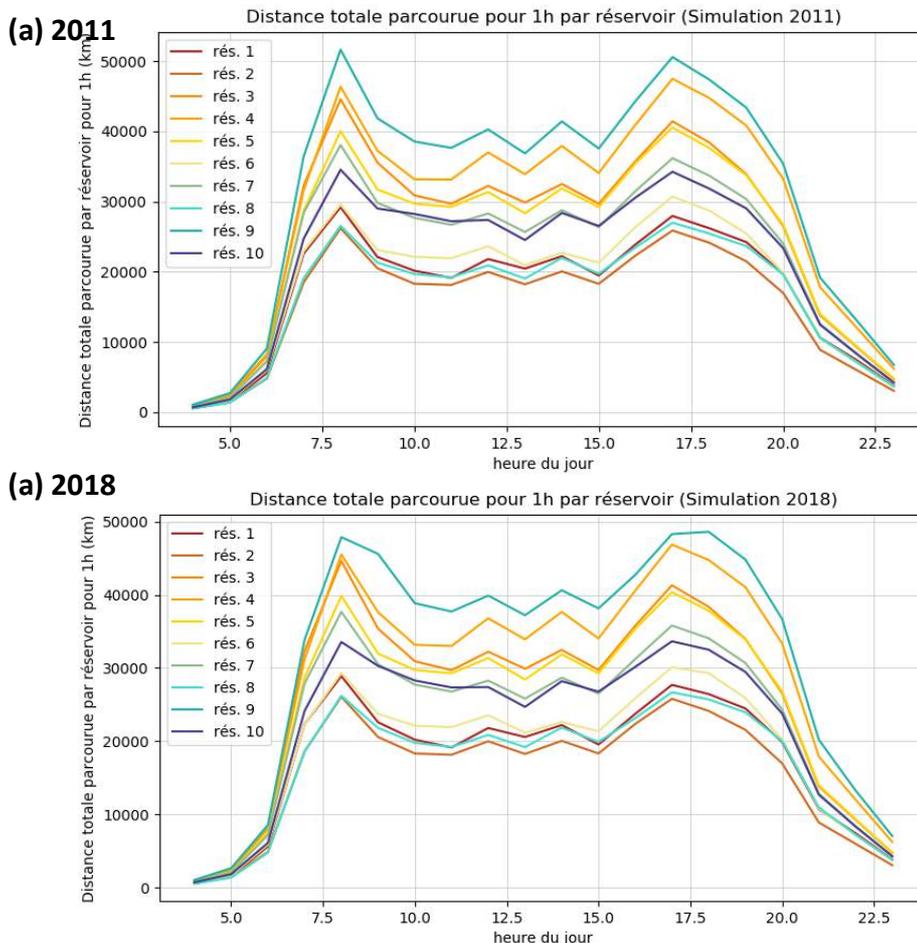


Figure 42 : Courbe des distances totales par réservoir et par heure pour la simulation (a) 2011, (b) 2018

Si on compare maintenant la différence relative de la distance parcourue de réservoir à réservoir on obtient la **Figure 43** ci-dessous. Le plus gros écart notable est attribué au réservoir 9 : par exemple, dans la simulation 2011 à 8h, les véhicules parcourent 8% fois plus de distance que dans la simulation de 2018, ce qui représente 4 000 km parcourus en plus par rapport à la Simulation 2011. Dans les autres réservoirs, la différence relative ne dépasse pas 5% en valeur absolue.

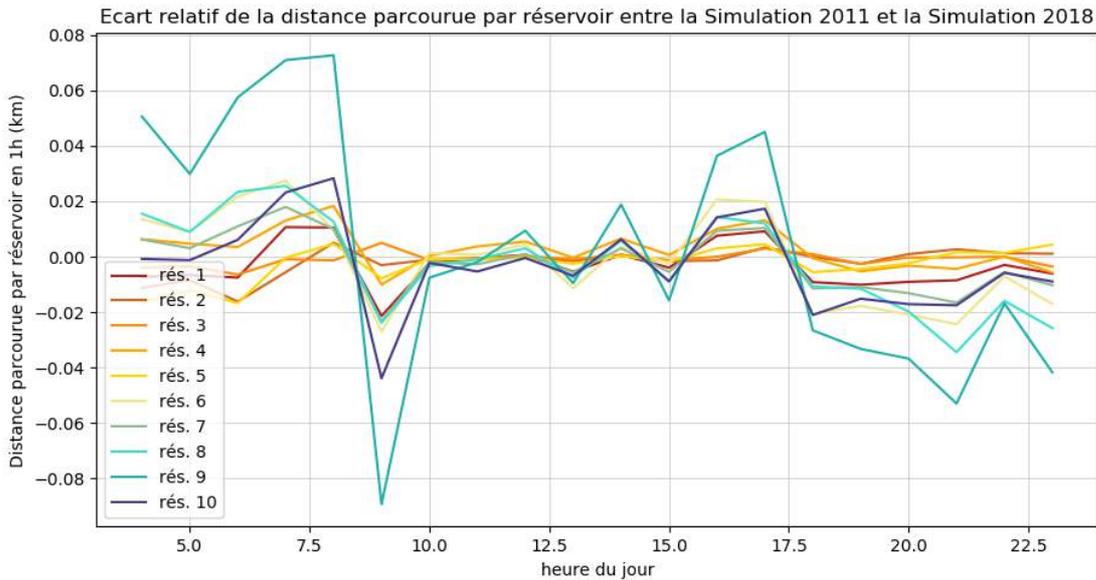


Figure 43 : Ecart relatif entre la distance parcourue dans un réservoir en Simulation 2018 par rapport à celle en Simulation 2011

Conclusion

Les résultats de simulation entre 2011 et 2018 possèdent un même profil de variation avec un pic le matin à 8h-9h et un pic le soir entre 17h et 18h. Quelle que soit la simulation, le réservoir où la distance parcourue par réservoir est la plus élevée est le réservoir 9 et celle la moins élevée est le réservoir 2. L'écart le plus important entre les deux simulations est imputé au réservoir 9 où, par rapport à la Simulation 2011, l'accumulation est plus grande et la vitesse plus basse: cela représente un écart de 8% des distances parcourues par réservoir à 8h entre les deux simulations.

III.3 Comparaison entre les émissions ATMO et la simulation couplée

Etant donné que les résultats d'émission du modèle de trafic ont été obtenus pour la semaine ouvrée du 5 février au 9 février 2018, ces valeurs seront donc comparées aux émissions ATMO sur la même période. On fait ainsi une moyenne horaire des émissions pour ces 5 jours. Faire une moyenne horaire est pertinent ici, car les courbes d'émissions horaires des polluants ont la même allure au cours d'une journée entre le 5 et le 9 février 2018. En effet, puisque l'émission horaire est calculée comme le produit des émissions mensuelles et du coefficient horaire, il suffit de regarder la tendance des coefficients horaires pour s'en apercevoir. La **Figure 44** montre que les courbes des coefficients horaires sont presque confondues (en gris sur la figure) : on retrouve un pic le matin et un pic le soir avec des valeurs de même ordre de grandeur sur les cinq jours. La courbe orange représente le coefficient horaire moyen sur ces cinq jours avec lequel on va calculer les émissions horaires des polluants sur les 10 réservoirs.

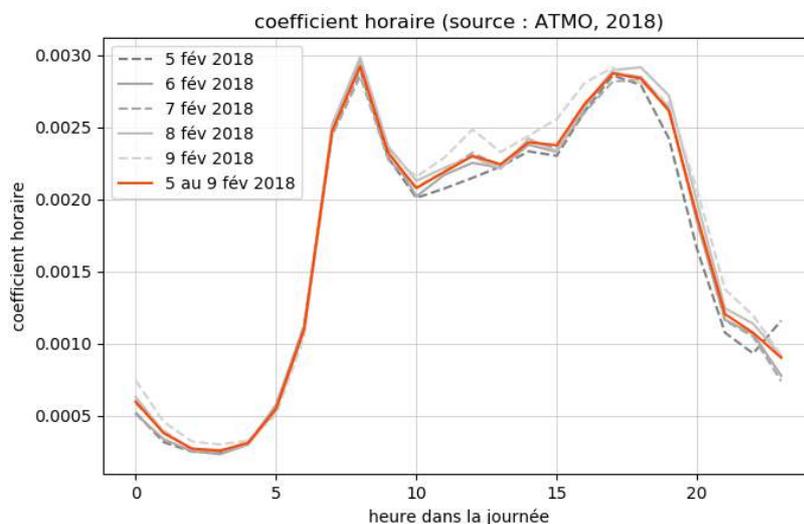


Figure 44 : Evolution du coefficient d'émission horaire pour les cinq jours entre le 5 et le 9 février 2018 (en gris) et la moyenne horaire obtenue sur les cinq jours (en orange)

On va étudier les résultats d'émissions de trois polluants selon deux méthodes de calcul.

- Méthode 1 : calcul des émissions totales en considérant un parc moyen regroupant VP, VUL, PL et bus.
- Méthode 2 : calcul des émissions totales en séparant le calcul des voitures légères (VP et VUL) et des voitures lourdes (PL et bus) ; on considère dans ce cas que les émissions calculées avec la Méthode 1 ne concernent en réalité que les VP et les VUL. On s'appuie notamment sur la description du parc avec 93% de véhicules légers et 7% de véhicules légers.

III.3.1 Méthode de calcul 1 : calcul des émissions avec un parc moyen

Les émissions de polluants est calculé avec la formule suivante (méthode de calcul 1 « M1 ») : $E_{res} = D_{parc\ moyen, res} F E_{parc\ moyen}(\bar{v})$. Dans ce cas, on estime que la sortie du simulateur MFD est valable pour un parc moyen.

III.3.1.1 Emissions globale de polluants

Les émissions globales correspondent aux émissions de polluants sur l'ensemble du territoire d'étude sans distinguer les réservoirs entre eux. On a tracé sur la **Figure 45** les émissions globales par heure estimées par ATMO 2018 (vert) et celles obtenues par les Simulations 2011 (en bleu) et 2018 (en rouge) pour les trois polluants étudiés : les PM10 (**Figure 45.a**), les NOx (**Figure 45.b**) et le CO₂ (**Figure 45.c**). On ne possède que les données d'ATMO 2018, ainsi les résultats de la simulation 2011 se feront sur cette base de données.

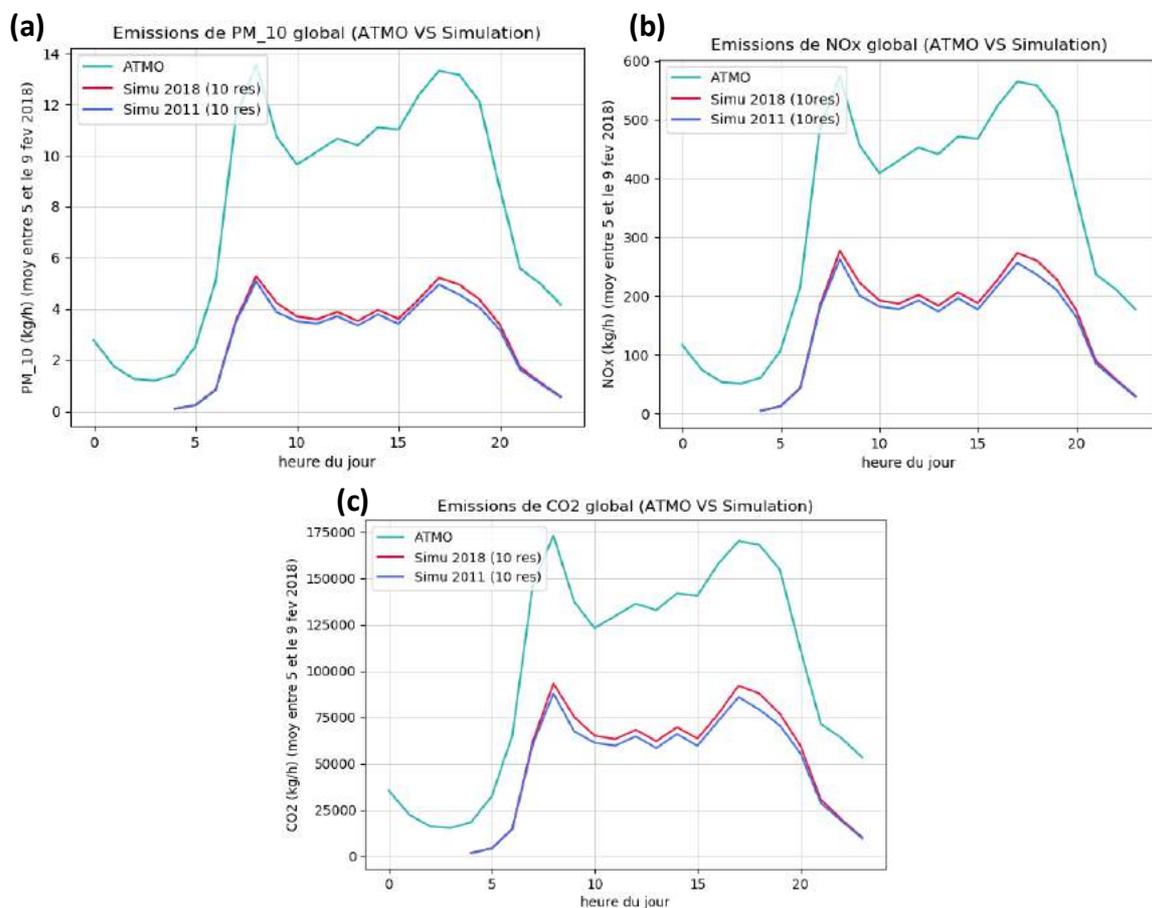


Figure 45 : Emissions de polluants sur tout le territoire d'étude pour ATMO et les 2 simulations 2011 et 2018 pour (a) les PM10, (b) les NOx, (c) le CO2

Quel que soit le polluant, la simulation couplée sous-estime les émissions de polluants par rapport aux courbes d'ATMO. On retrouve néanmoins les mêmes allures de courbes entre les simulations couplées et les courbes ATMO, notamment les deux pics journaliers à 8h et à 17h.

- Pour le CO₂, les simulations 2018 et 2011 estiment entre 40 et 55% des émissions d'ATMO. Les résultats de la Simulation 2018 sont légèrement meilleurs que ceux de la Simulation 2011 à hauteur d'environ 3 points en plus voire 5 points en plus à 18h.

- Pour les NOx et les PM10, les simulations 2018 et 2011 estiment entre 30 et 40% des émissions d'ATMO

III.3.1.2 Ecart relatif entre les simulations et ATMO

Pour analyser les résultats de manière comparative, nous avons calculé, pour chaque réservoir, les écarts relatifs des émissions : les deux simulations et les émissions d'ATMO. Les résultats des courbes d'évolution de l'écart relatif pour chacune des simulations et chacun des polluants sont présentés dans la **Figure 46** où la droite horizontale rouge met en avant les valeurs en dessous de 0.

On rappelle qu'un écart relatif proche de 0 signifie que les émissions de polluant sont relativement bien estimées par le modèle couplé dans ce réservoir, et inversement si l'écart relatif en valeur absolu est proche de 1.

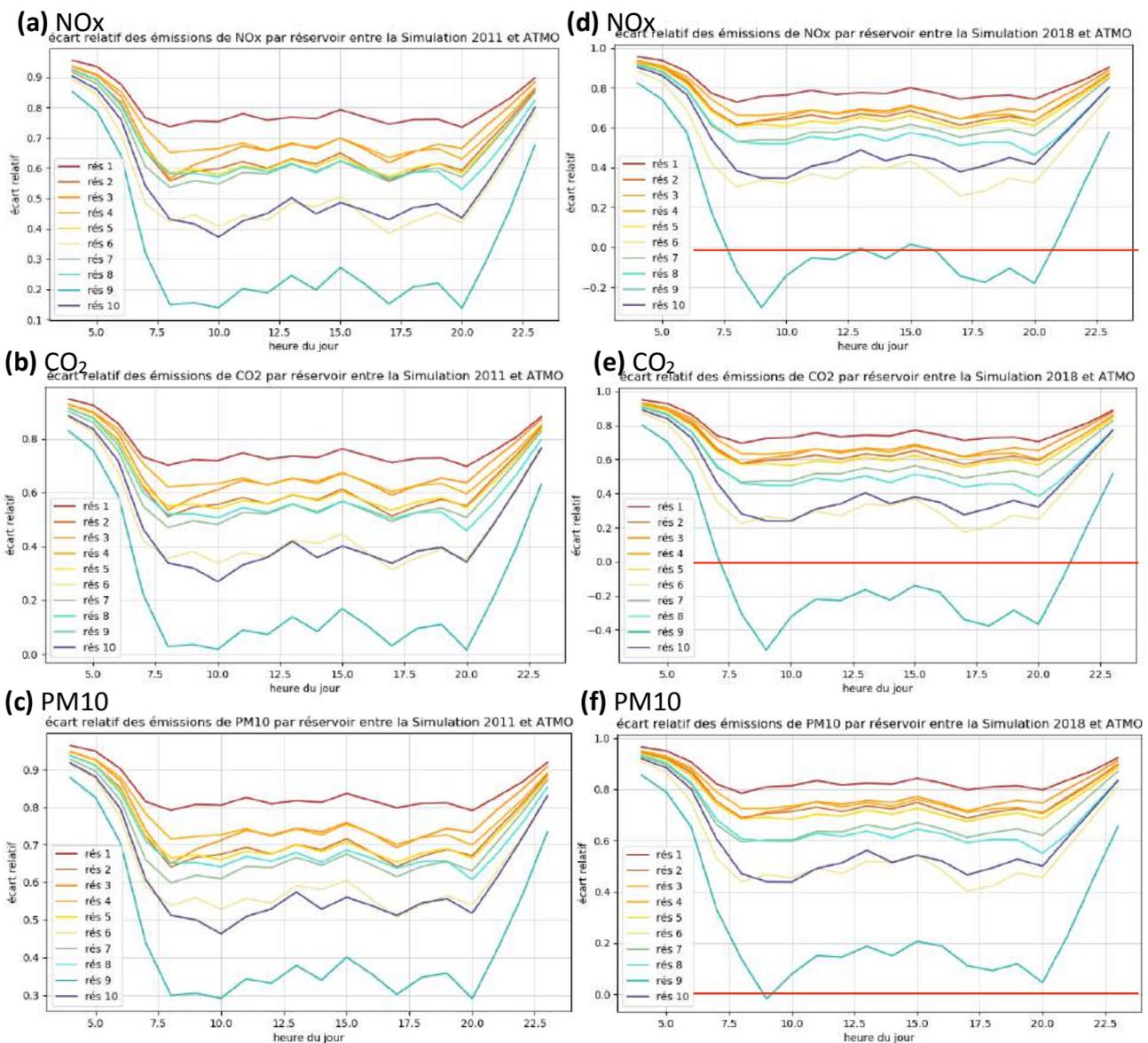


Figure 46 : Ecart relatif des émissions de polluants par réservoir entre la Simulation 2011 et ATMO pour (a) les NOx (b) le CO₂ (c) et les PM10 entre la Simulation 2018 et ATMO pour (d) les NOx (e) le CO₂ (f) et les PM10

Les variations des écarts relatifs sont similaires pour les émissions des trois polluants et pour les 2 simulations. Sur la **Figure 46**, on peut distinguer plusieurs périodes :

- les polluants sont très mal estimés entre 4h et 6h : en effet, les écarts relatifs sont compris entre 0,8 et 1 à 4h du matin. Ceci peut d'abord s'expliquer par le fait qu'il s'agit du début de la simulation : puisque le réseau est initialement vide et qu'il y a un chargement de voitures qui arrive au fur et à mesure, les valeurs issues du modèle de trafic sont donc biaisées.
- Entre 4h et 8h, la totalité des écarts relatifs diminuent,
- Entre 8h et 20h, les écarts relatifs sont stables dans le temps. Les deux simulations ont un même profil de variations, ce qui signifie qu'elles ont une même approche temporelle.
- Enfin, entre 20h et 23h, les écarts relatifs augmentent de nouveau,

Un écart relatif positif indique que la valeur d'émission simulée sous-estime les valeurs d'émission ATMO. Ici, les écarts relatifs sont tous positifs, sauf dans deux cas qui concernent le réservoir 9 en simulation 2018. En effet, l'écart relatif est négatif dans le calcul des émissions de CO₂ et de NO_x, ce qui signifie que les émissions sont surestimées dans ces cas-là. En effet, si on affiche les émissions de CO₂ pour la simulation 2018 (voir **Figure 47.a**), la courbe des émissions de la simulation 2018 en rouge est au-dessus de celle d'ATMO en gris.

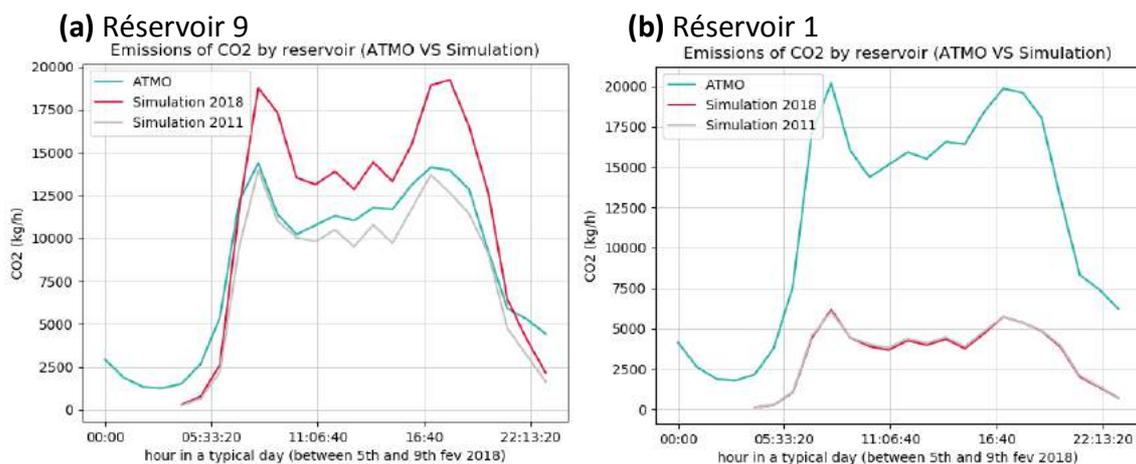


Figure 47 : Emissions de CO₂ d'ATMO et en Simulation 2018 et 2011

(a) dans le réservoir 9 : en Simulation 2018 les émissions sont surestimées

(b) dans le réservoir 1 : en Simulation 2018 les émissions les plus sous-estimées de tous les réservoirs

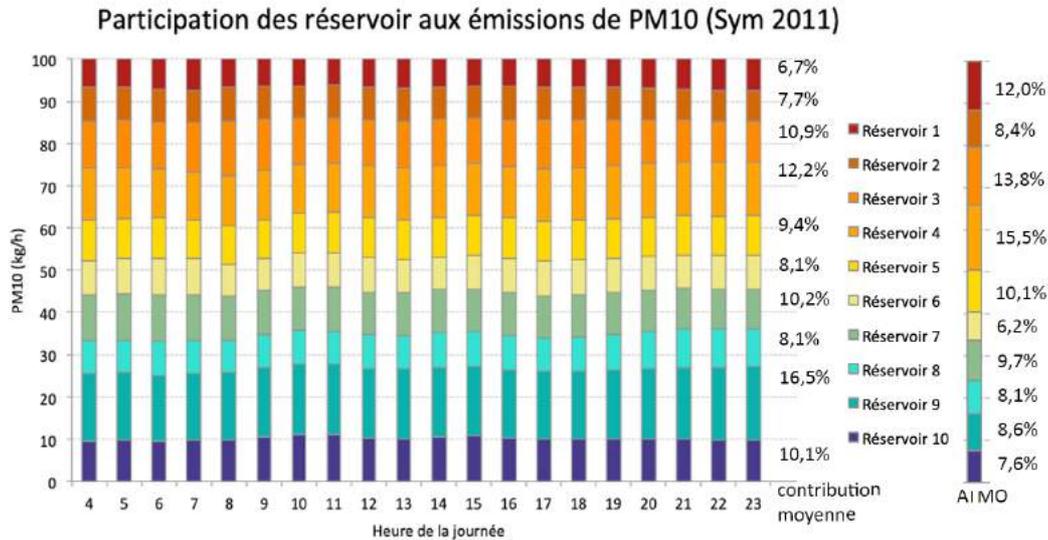
Pour analyser les réservoirs qui se rapprochent le plus de 0, on analyse l'écart en valeur absolue. L'ordre entre réservoirs est conservé pour polluants NO_x, PM₁₀ et pour le CO₂ seulement pour la simulation 2011. Ainsi, l'écart relatif en valeur absolu le plus faible est attribué au réservoir 9 : écart compris entre 0 et 0,4 entre 8h et 20h. A l'inverse, les émissions dans le réservoir 1 sont le plus mal estimées par le modèle couplé (voir **Figure 47.b**) : l'écart relatif est toujours supérieur à 0,7.

Ces résultats restent cependant à nuancer, bien qu'un réservoir estime relativement bien ou mal les émissions, il faut se demander si la part d'émission qu'il représente est cohérente à grande échelle. Quelle est donc la contribution de chaque réservoir aux émissions globales : y a-t-il un réservoir qui sur-représente les émissions ? Le modèle reste-t-il cohérent entre les réservoirs à l'échelle globale ?

III.3.1.3 Contribution de chaque réservoir aux émissions globales

L'histogramme ci-dessous illustre la contribution de chaque réservoir aux émissions globales de PM10 au cours de la journée pour la Simulation 2011 (**Figure 48a**) et la Simulation 2018 (**Figure 48b**).

(a) Simulation 2011



(b) Simulation 2018

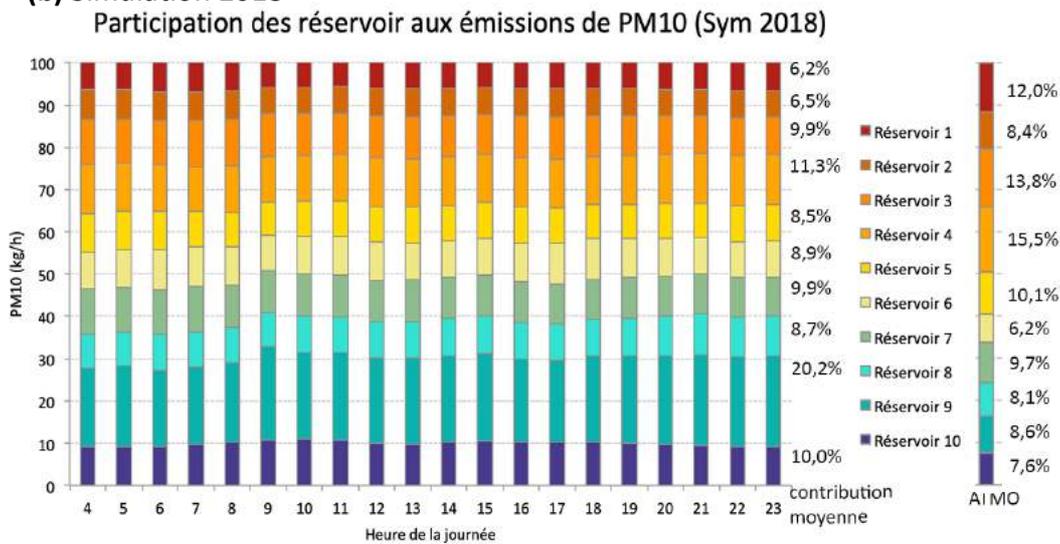


Figure 48 : Contribution des réservoirs aux émissions horaires globales de PM10 (a) pour la Simulation 2011 ; (b) pour la Simulation 2018 en comparaison avec les émissions ATMO

On peut remarquer que la participation des réservoirs aux émissions de polluants est stable dans le temps dans les deux simulations. En effet, dans la **Figure 48.a** et la **Figure 48.b**, la bande colorée correspondant aux parts d'émissions n'évolue pas beaucoup dans le temps.

Si on se penche sur la contribution des réservoirs aux émissions globales d'ATMO (à droite dans les figures) et qu'on compare la part de chaque réservoir à celle des simulations, on peut remarquer que les réservoirs sont inégaux. En effet, les émissions du réservoir 1 sont largement sous-estimées : alors que le réservoir 1 contribue à hauteur de 12% aux émissions globales de PM10, la participation n'est que d'environ 6,5% dans les deux simulations. Il en est de même avec les réservoirs 1, 2, 3, 4 et 5. Au contraire, les émissions produites par le réservoir 9 participent à 20%

(resp. 16,5%) aux émissions globales en Simulation 2018 (resp. Simulation 2011) ce qui représente près de 2,5 fois plus (resp. 2 fois plus) que ce qui est estimé sur ATMO.

Les résultats obtenus sur le réservoir 9 peuvent être expliqués par un défaut de calage des sorties du modèle de trafic par rapport aux données empiriques. En effet, dans ce réservoir, les valeurs d'accumulation en sortie du modèle étaient 1,5 fois plus hautes que les données empiriques. D'autre part, on peut supposer que les différences notables entre la simulation de 2011 et la simulation de 2018 au niveau de ce réservoir provient de la valeur de la vitesse. En simulation 2018 la vitesse moyenne pratiquée au cours d'1h dans ce réservoir est plus basse d'environ 10km/h fois inférieure à celle de la simulation 2011. Or d'après la courbe de COPERT V sur les émissions de polluants, une vitesse plus basse indiquerait des émissions plus élevées. D'où la contribution aux émissions globales à hauteur de 20% en simulation 2018 et de 16,5% en simulation 2011 au lieu de 8,6% sur ATMO.

Conclusion

Finalement, quel que soit le polluant (CO₂, NOX et PM10), le modèle couplé sous-estime les émissions de polluants par rapport à ATMO, à hauteur de 50% au plus des émissions ATMO. Les réservoirs de 1 à 5 sous-contribuent aux émissions de polluants, à l'inverse des réservoirs 6 à 10 qui sur-contribuent aux émissions de polluants. La répartition des émissions globales entre réservoirs est particulièrement déséquilibrée par rapport aux données ATMO : un réservoir possède près de 20% des émissions globales de polluants, ce qui fait 2,5 fois plus que la part estimée sur ATMO. On suppose que ce déséquilibre vient d'un défaut du calage du modèle de 2018 sur les données empiriques.

La simulation 2018 est légèrement meilleure que la simulation 2011 pour estimer les émissions globale de polluants, alors que 2011 estime entre 40 et 50% des émissions de CO₂, 2018 estime entre 3 et 5 points de plus. On retiendra que le modèle d'émission est peu sensible au calage du modèle pour les estimations globales.

III.3.2 Méthode de calcul 2 : calcul des émissions en distinguant les véhicules lourds et les véhicules légers

Une deuxième méthode de calcul (« M2 ») des émissions consiste à penser que le modèle de trafic ne considère que les véhicules légers. Ainsi, les émissions de polluants calculées directement par le modèle de trafic n'estiment que les émissions des véhicules légers et doivent être majorées des émissions des poids lourds selon la formule :

$$E_{res} = D_{simu,rés}(FE_{VP+VUL}(\overline{v_{simu,rés}}) + \frac{7}{93}FE_{bus+PL}(\overline{v_{simu,rés}}))$$

où E_{res} est l'émission par réservoirs, $D_{simu,rés}$ est la distance parcourue dans ce réservoir et $\overline{v_{simu,rés}}$ est la vitesse moyenne dans le réservoir.

On rappelle que les courbes des facteurs d'émissions sont disponibles à la **Figure 35** Chapitre 2 §II.3.1.

III.3.2.1 Emissions globales de polluants

La **Figure 49** représente les émissions de NOX, PM10 et CO2 estimées par ATMO (courbe verte), et les deux simulations pour les méthodes de calcul « M1 » (traits pleins) et « M2 » (traits pointillés).

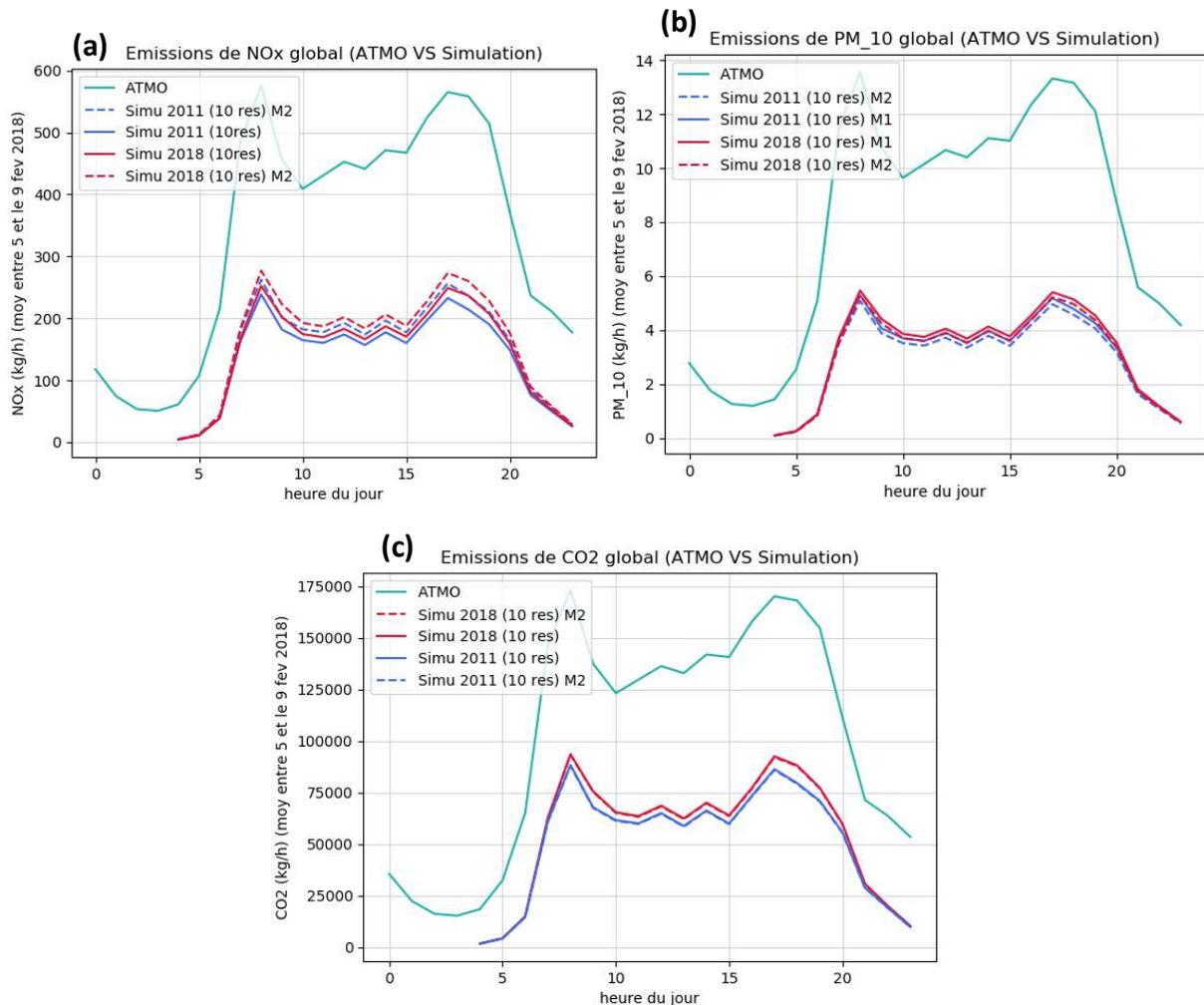


Figure 49 : Emissions globales de polluants pour les Simulations 2011 (en bleu) et 2018 (en rouge) avec les méthodes de calcul « M1 » (traits pleins) et « M2 » (traits pointillés). (a) émissions de NOx ; (b) émissions de PM10 ; (c) émissions de CO₂

Les courbes d'émissions générées par la méthode 2 ont la même allure que les courbes d'émission calculées avec la méthode 1. On peut ainsi observer un pic dans la matinée à 8h et un pic en soirée à 17h. Les émissions globales de polluants calculées avec le modèle couplé sous-estime les émissions de polluants d'ATMO avec un écart d'environ 50%. On peut déjà remarquer que la méthode de calcul 2 estime un plus fort taux d'émission pour les NOx, contrairement aux deux autres polluants qui ont des émissions plus basses qu'avec la méthode 1.

Nous allons à présent regarder la différence entre les deux méthodes de calcul en terme d'écart relatif. Peut-on toujours dire que la méthode 2 est meilleure pour estimer les émissions de polluants ?

III.3.2.2 Ecart relatif entre les simulations et ATMO

La **Figure 50** ci-dessous montre l'écart relatif des émissions entre la méthode 1 et la méthode 2.

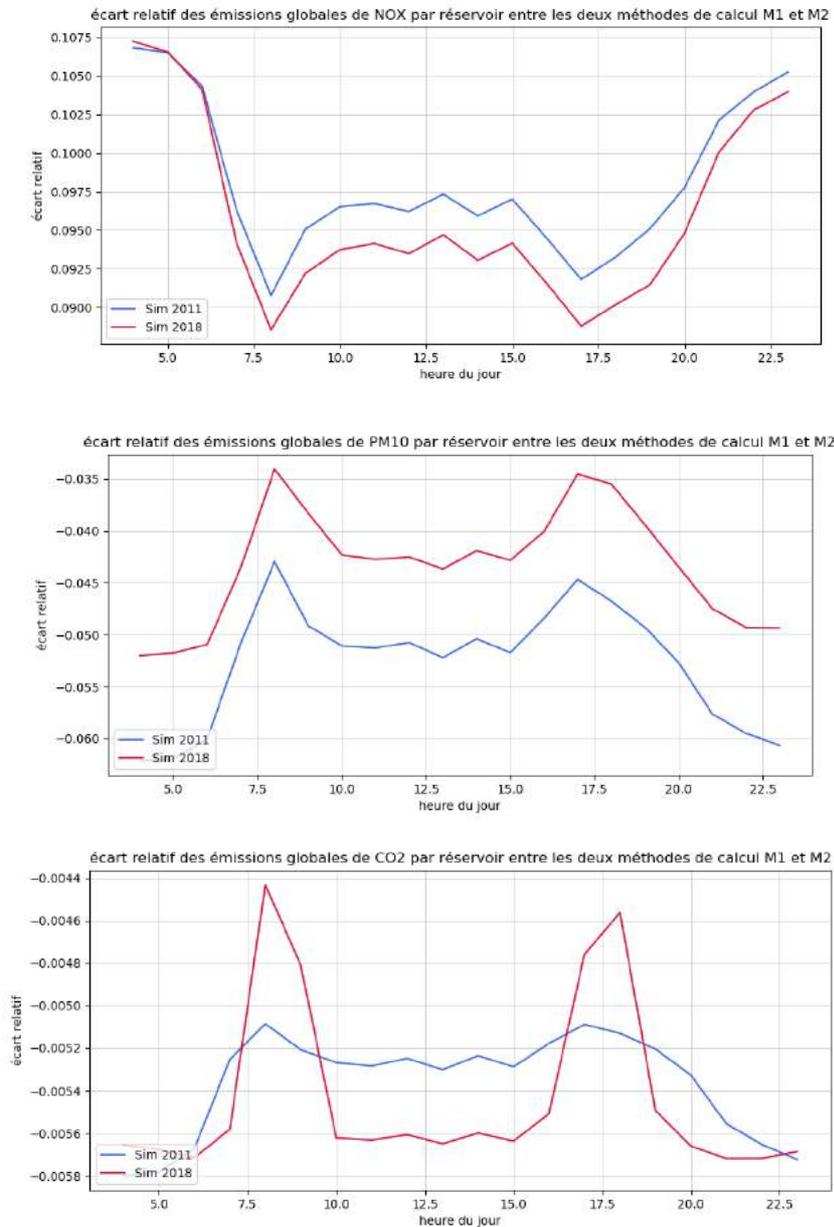


Figure 50 : Ecarts relatifs des émissions globales de polluants entre les deux méthodes de calcul d'émissions M1 et M2 pour la simulation 2011 (en bleu) et la simulation 2018 (en rouge) pour les émissions de (a) NO_x ; (b) PM₁₀ ; (c) CO₂

Les écarts relatifs révèlent qu'à l'heure du midi, les émissions de NO_x sont environ 9,5 fois plus élevés avec la méthode de calcul 2 qu'avec la méthode 1. Au contraire les émissions sont plus faibles pour les émissions de PM₁₀ (-4,5% en Simulation 2018 et -4% en Simulation 2011) et quasiment négligeable pour les CO₂ avec une différence de moins de 0,6%).

Conclusion

Finalement, on ne peut pas considérer que la méthode de calcul 2 permette de mieux calculer les émissions de polluants à l'échelle de la ville ; la Méthode 2 n'augmente significativement que les émissions globales de NOx de 9,5% par rapport à la Méthode 1, ce qui représente 5% des émissions d'ATMO. De plus, elle n'estime que la moitié des émissions prédites par ATMO.

Discussion

La pollution atmosphérique générée par le trafic routier constitue un enjeu majeur en termes de santé publique et d'environnement. Un des axes de travail du LICIT porte sur la gestion du trafic avec deux objectifs : fluidifier le trafic et réduire les émissions de polluants atmosphériques. Le laboratoire dispose d'un modèle de trafic performant qui a été couplé au modèle d'émissions COPERT développé au sein du projet européen MAGNUM.

Ce modèle couplé trafic-émissions nécessite en entrée des données préalablement pré-traitées à partir de nombreuses bases de données (FCD, données boucles, EMD, COPERT, etc). La **Figure 51** récapitule l'ensemble des actions réalisées.

Dans une première étape, il s'agit de comparer l'influence du calage du modèle couplé trafic-émissions. Deux simulations ont été réalisées : le modèle couplé trafic-émission est appliqué sur la métropole de Lyon, avec un découpage spatial de la métropole en 10 réservoirs, d'une part avec un calage basé sur des données de 2011, et d'autre part avec un calage basé sur des données de 2018. Les résultats de simulation 2011 et 2018 ont ensuite été comparés aux données d'ATMO Auvergne Rhône Alpes pour l'année 2018.

Les résultats montrent qu'en l'état actuel, le modèle couplé trafic-émission ne permet pas d'estimer de manière satisfaisante les émissions de polluants CO₂, NO_x et PM₁₀. Les valeurs d'émissions de ces polluants sont estimées à 50% par le modèle à l'heure du midi par rapport aux données d'ATMO Auvergne Rhône Alpes. De plus, la contribution des réservoirs aux émissions globales ne suit pas la tendance décrite par ATMO : un des réservoirs double sa participation aux émissions de polluants (réservoir 9 au Centre), tandis que d'autres la divisent par deux (réservoir 1 à l'Est).

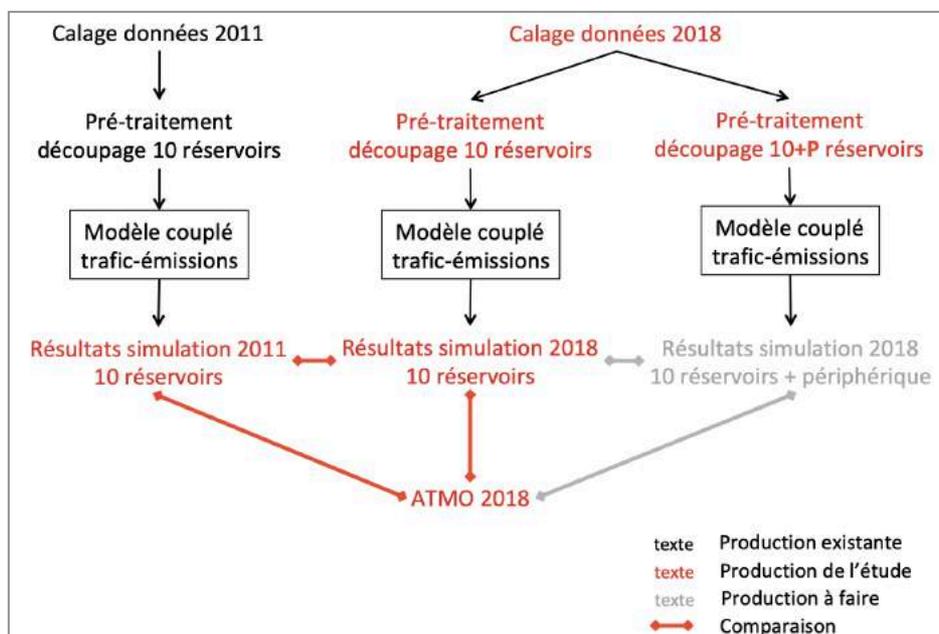


Figure 51 : Schéma de la production faite au cours de l'étude

Le critère du découpage spatial consistant à isoler le périphérique pour l'étudier comme un 11^{ème} réservoir n'a pas pu être étudié au cours de cette étude. Cependant, les données nécessaires pour

l'exécution du modèle de trafic ont toutes été produites. Il serait intéressant de poursuivre l'analyse et de voir quel est l'impact de l'isolement du périphérique comme 11^{ème} réservoir : ce découpage permet-il de mieux estimer les émissions de polluants sur le réseau de Lyon ?

Néanmoins, le LICIT travaille actuellement sur la création d'un modèle dit « hybride » qui fonctionnerait avec une approche à la fois macroscopique et microscopique. Le périphérique serait simulé à l'échelle microscopique du véhicule avec le logiciel Symuvia et le reste du réseau simulerait le trafic en s'appuyant sur les modèles macroscopiques. Le modèle hybride offre de nombreuses perspectives en termes d'évaluation environnementale, notamment en termes de précision sur le périphérique.

Au cours de cette étude, nous avons relevé plusieurs limites qui pourraient constituer des points d'amélioration. L'écart entre les données est sûrement le produit d'effets qui s'accumulent. Parmi les facteurs d'erreurs, on peut citer :

- Les hypothèses faites dans la simulation (véhicules qui roulent à vide, la pente nulle). D'après (M.André, D.Lejri et al, 2016), le paramètre de chargement dans COPERT peut avoir beaucoup de conséquences. Par exemple, sur les émissions de CO₂ il peut y avoir un écart de l'ordre de 56% entre un camion à vide ou chargé et de 20 à 22% pour les NOx. De plus, le phénomène est amplifié pour des axes routiers ayant un fort trafic de PL, ce qui est le cas du périphérique dans le réseau d'étude.
- L'hétérogénéité du réseau. Le réseau est composé de liens du réseau qui n'ont pas toujours les mêmes conditions de trafic (vitesse à 70 km/h sur le périphérique, contre environ 35km/h en ville). Ces hétérogénéités ont pour conséquence une mauvaise estimation des MFD. Or les MFD sont à la base du modèle de trafic.
- Les distances parcourues par réservoir. Nous n'avons aucune donnée sur la distance parcourue par réservoir dans les estimations d'ATMO : or d'après la formule des émissions est fonction de la valeur de la distance parcourue. Il serait intéressant de comparer les distances d'ATMO et celles de la simulation. Cela permettrait d'avoir une base de comparaison entre les deux modèles de prédiction d'émission.
- Le facteur d'échelle Γ qui permet d'estimer la production. Ce facteur d'échelle pose l'hypothèse que la production est la même sur les liens non équipés de boucle de comptage. Cette grosse hypothèse peut être une source d'erreur sur l'estimation de la production.

Parmi les facteurs cités, Le facteur d'échelle Γ apparaît comme le paramètre le plus impactant sur la simulation. C'est pourquoi il s'agit d'une piste prioritaire pour améliorer le modèle. En effet, voir que les courbes d'accumulation en simulation se superposent aux données empiriques n'indique pas que le modèle est calé. Les courbes d'accumulation restent flottantes à un facteur d'échelle près, et on fixe ce facteur d'échelle pour que la simulation fonctionne. Cependant le facteur d'échelle, tel qu'il est considéré actuellement, n'est pas objectif. Une idée à développer serait donc d'utiliser les données d'émissions ATMO pour caler l'accumulation du modèle de trafic.

Références

- N. Geroliminis et C. Daganzo, (2008). «Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings.», *Transportation Research Part B: Methodological*, vol 42, n°9, p. 759-770
- L. Knoop, Victor, D. De Jong et P. Hoogendoorn, (2014). «Influence of road layout on network fundamental diagram.», *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol 1, n°2421, p. 22-30.
- C. Buisson, C. Ladier (2009). « Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams », *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2124 :127-136
- V. Gayah et C. F. Daganzo, (2011). «Clockwise hysteresis loops in the macroscopic fundamental diagram: An effect of network instability.», *Transportation Research Part B: Methodological*, vol 45, n°4, p. 643-655.
- C. Buisson et J-B. Lessort, J-B., (2010). Analyse du diagramme fondamental. Dans : « Comprendre le trafic routier. Méthodes et calculs. » Ed. CERTU. 111p, Coll. Références, 978-2-11-098892-8, p. 29-30 ([hal-01425259](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01425259))
- J.W. Godfrey, (1969). « The mechanism of a road network. *Traffic Engineering and Control* », *Traffic engineering & control*, vol 11, n°7, 323–327.
- N. Geroliminis et J. Sun, (2011). «Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic.», *Transportation Research Part B : Methodological*, vol 45, n°3, p. 605-617.
- G. Mariotte (2018). « Dynamic Modeling of Large-Scale Urban Transportation Systems », Thèse de doctorat de Génie Civil, sous la direction de Ludovic Leclercq, Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 246p.
- M. Yildirimogly et N. Geroliminis (2014). « Approximating dynamic equilibrium conditions with macroscopic fundamental diagrams », *Transportation Research Part B : Methodological*, vol 70, p. 186-200.
- M. André, E. Brutti-Mairesse (2015). « Evaluation de l'impact d'un PDU : problématique de l'émission de polluants atmosphériques. » *Recherche Transports Sécurité, NecPlus, Evaluation environnementale des PDU 2015 (02)*, pp. 121-133. 10.4074/S0761898015002058. <hal-01277758v2>
- Y. Lebrech (2017). « Mémoire de stage : estimation des diagrammes fondamentaux de zone sur l'Agglomération lyonnaise », *Travail de fin d'année en Transports, Lyon : ENTPE, Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports (LICIT)*, 2017, p. 71
- Grand Lyon, (2019) « Taux et débits horaires et 6 minutes, événements perturbateurs, Métropole Lyonnaise de Janvier 2007 à Janvier 2019 », *Rapport explicatif des données de mesure du trafic*, p. 13

- G. Mariotte, L. Leclercq (2019) « Calibration and validation of a multi-reservoir MFD models: A case study in Lyon », Transportation Research Part B: Methodological, p. 29
- M. André, D. Lejri et al (2016) « Livrable 2.1a – Etude de sensibilité de l'estimation des émissions de trafic », Livrable du projet Trafipollu de Modélisation multi-échelle de la pollution due au trafic dans un environnement urbain, p.72

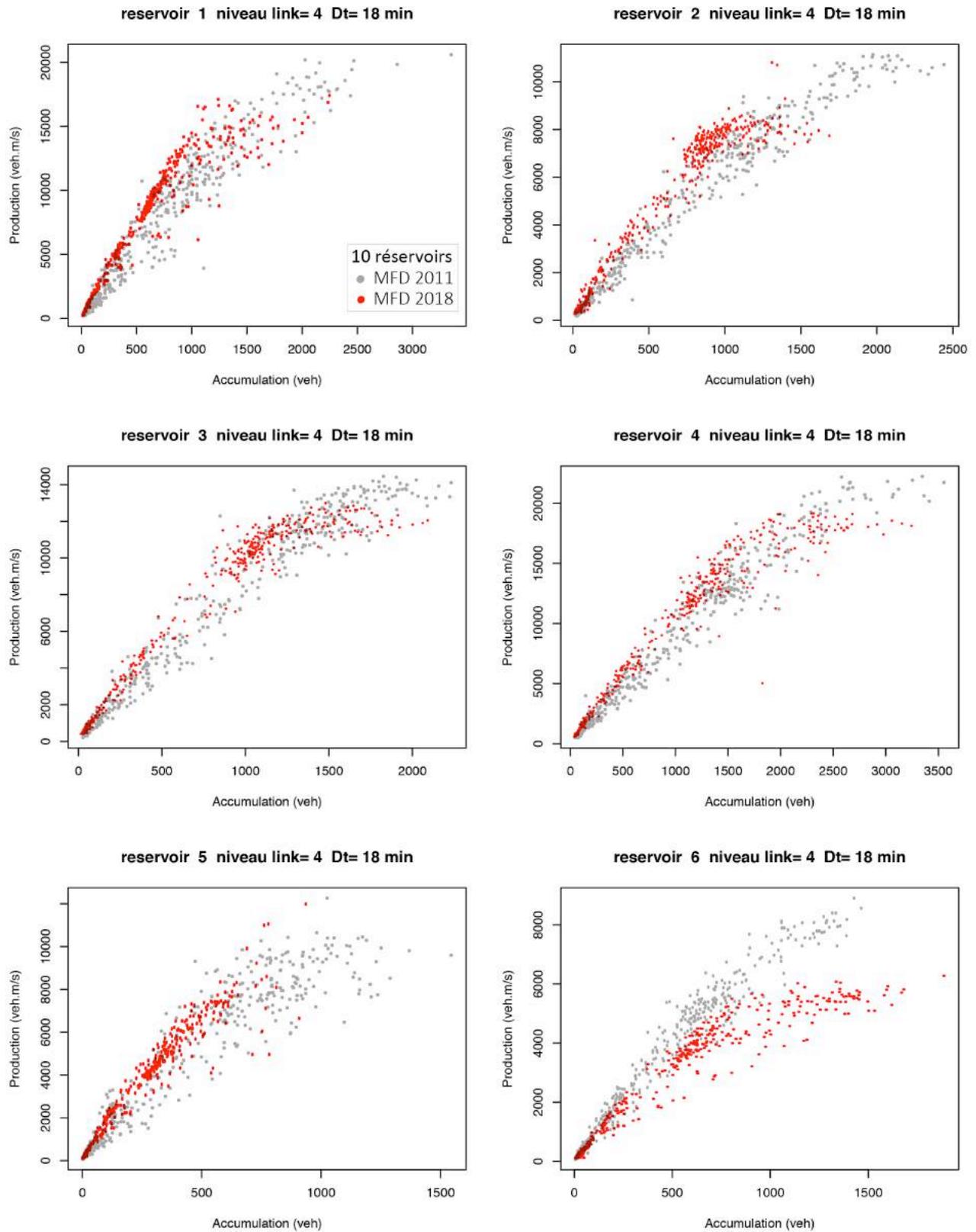
Sitographie

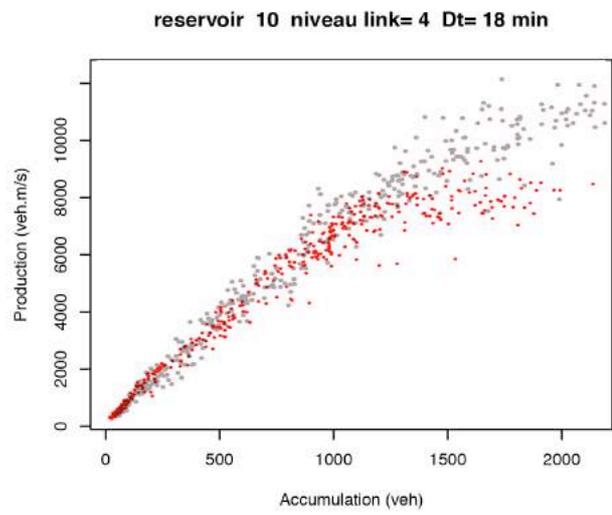
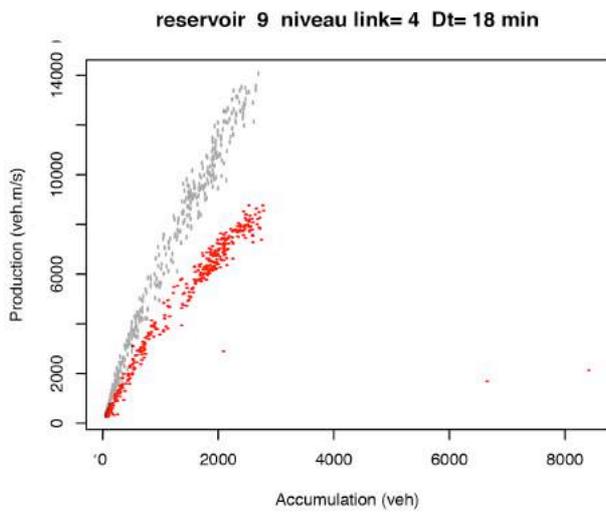
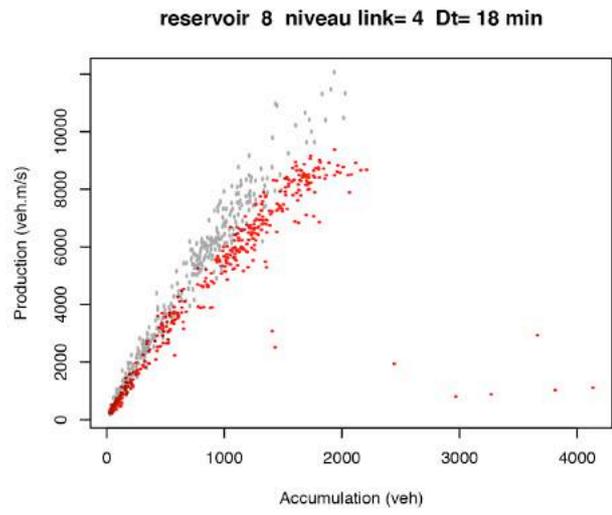
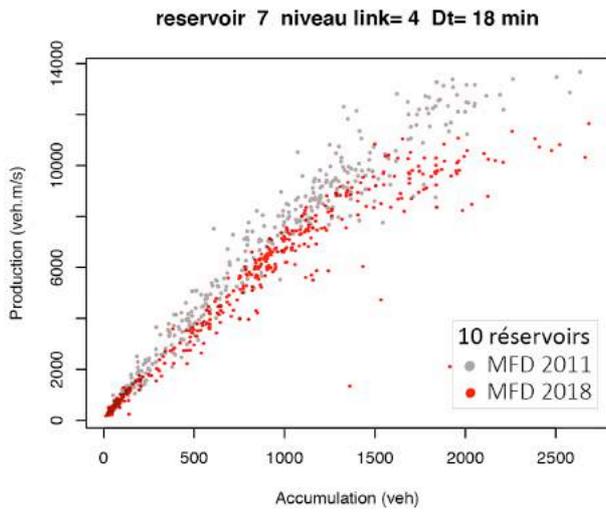
- Le Monde, « Voiture, Industrie, viande... Quelles sont les causes du réchauffement climatique en France ? » (2019) [en ligne] [consulté le 21 août 2019]. Disponible sur : https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/07/08/voiture-industrie-viande-queelles-sont-les-causes-du-rechauffement-climatique-en-france_5486767_4355770.html
- INSEE (Institut National de la Statistique et des Études Economiques), « Véhicules en service en 2017 » (2018) [en ligne] [consulté le 16 juillet 2019]. Disponible sur : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2045167#tableau-Tableau1>
- CITEPA (Centre Interprofessionnel Techniques d'Etude de la Pollution Atmosphérique), « Potentiel de réchauffement global – PRG » (2017) [en ligne] [consulté le 27 juin 2019]. Disponible sur : <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/effet-de-serre/potentiel-rechauffement-global-a-100-ans>
- OMS (Organisation Mondiale pour la Santé), « Pollution de l'air » (2018) [en ligne] [consulté le 27 juin 2019]. Disponible sur : https://www.who.int/topics/air_pollution/fr/
- OMS (Organisation Mondiale pour la santé), « Qualité de l'air ambiant » [en ligne] consulté le 10 juillet 2019]. Disponible sur : [https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- AEE (Agence Européenne pour l'Environnement), « Protocole de Kyoto : le secteur des transports à la traine » [en ligne]. [consulté le 25 juin 2019]. Disponible sur : <https://www.eea.europa.eu/fr/pressroom/newsreleases/protocole-de-kyoto-le-secteur-des-transport-a-la-traine>
- AEE (Agence Européenne pour l'Environnement), « La législation européenne sur l'air » (2016) [en ligne] [consulté le 10 juillet 2019]. Disponible sur : <https://www.eea.europa.eu/fr/signaux/signaux-2013/articles/la-legislation-europeenne-sur-l2019air>
- IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologie des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux), « LICIT, Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transport » [en ligne] [consulté le 25 juin 2019]. Disponible sur <https://www.licit.ifsttar.fr/>
- ENTPE (Ecole de l'aménagement durable des territoires), « Découvrir l'ENTPE » (2019) [en ligne] [consulté le 26 août 2019]. Disponible sur : <https://www.entpe.fr/decouvrir-entpe>
- ENTPE (Ecole de l'aménagement durable des territoires), « Laboratoire ingénierie, circulation, transports (LICIT) » (2019) [en ligne] [consulté le 11 juillet 2019]. Disponible sur : <https://www.entpe.fr/laboratoire-ingenierie-circulation-transport-licit>
- INSEE (Institut National de la Statistique et des Études Économiques), « IRIS » (2016) [en ligne] [consulté le 22 juillet 2019]. Disponible sur : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1523>

ATMO Auvergne-Rhône-Alpes, « Indices de qualité de l'air » [en ligne] [consulté le 20 août 2019].
Disponible sur : <https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/article/indices-de-qualite-de-lair>

Annexes

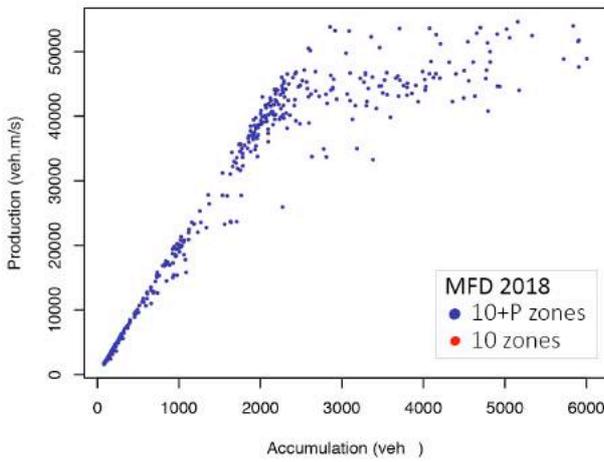
Annexe 1 : Comparaison des MFD avec des données 2011 (en gris) et les données 2018 (en rouge) pour 10 réservoirs.



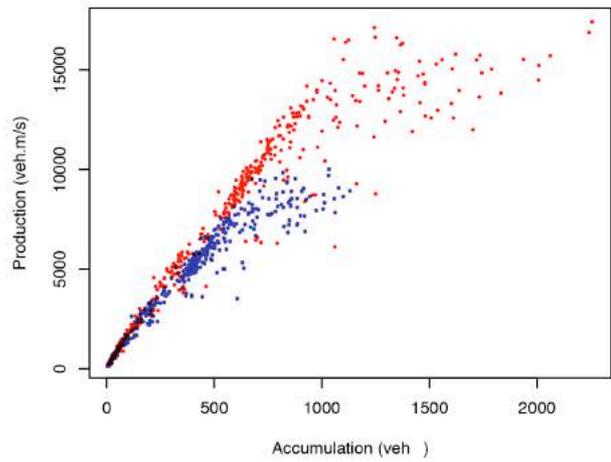


Annexe 2 : Comparaison des MFD avec les données 2018 pour 10 réservoirs (en rouge) et 10+P réservoirs (en bleu)

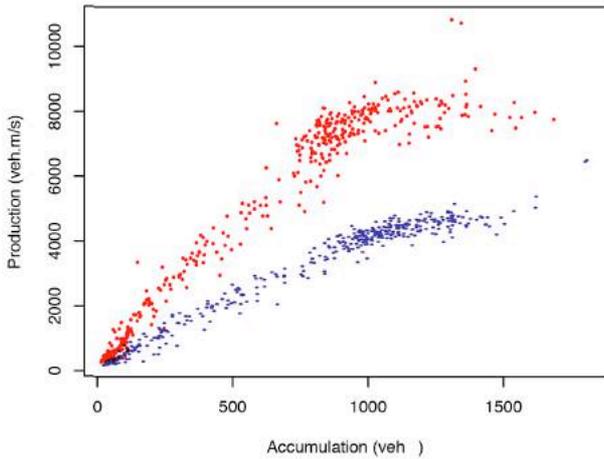
reservoir 0 niveau link= 4 Dt= 18 min



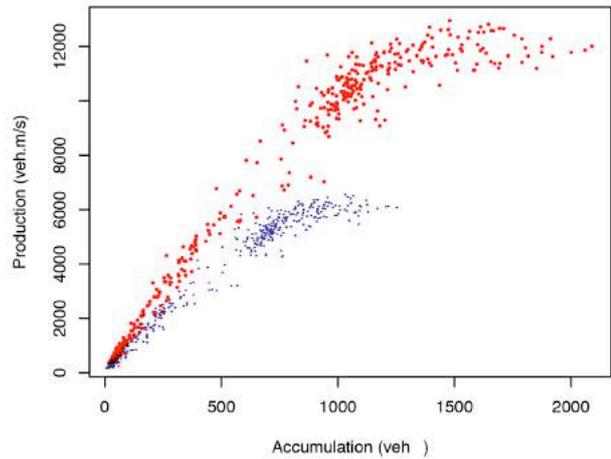
reservoir 1 niveau link= 4 Dt= 18 min



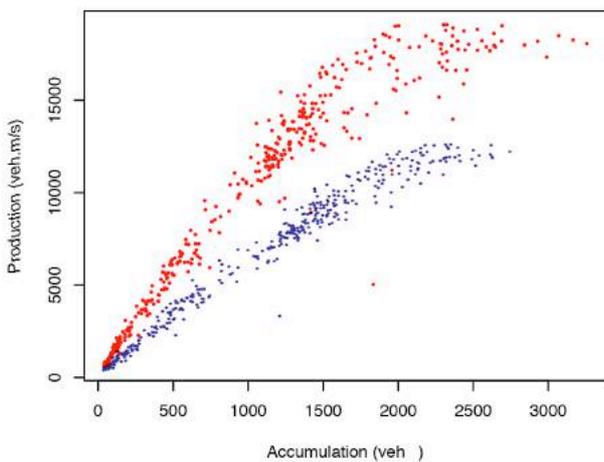
reservoir 2 niveau link= 4 Dt= 18 min



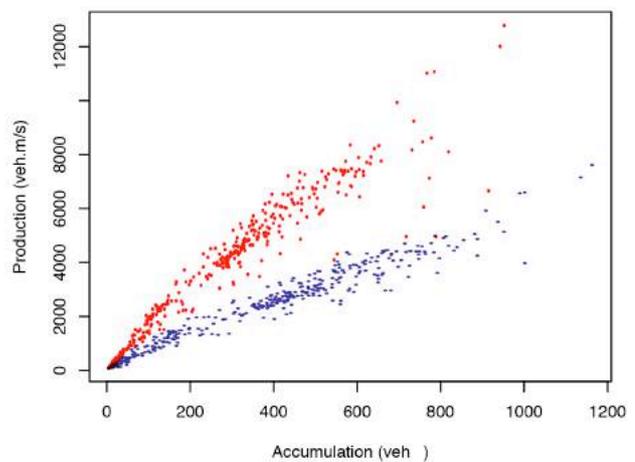
reservoir 3 niveau link= 4 Dt= 18 min



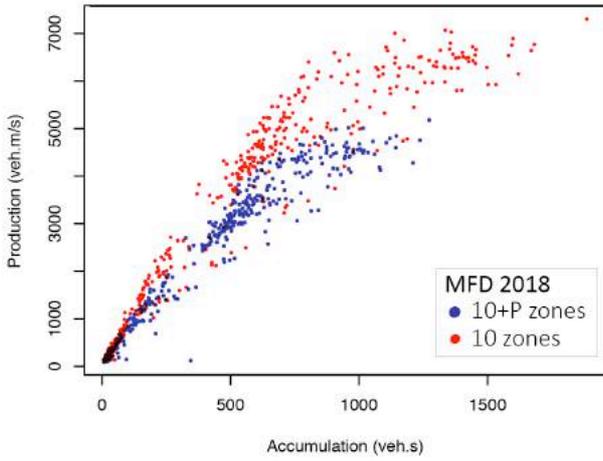
reservoir 4 niveau link= 4 Dt= 18 min



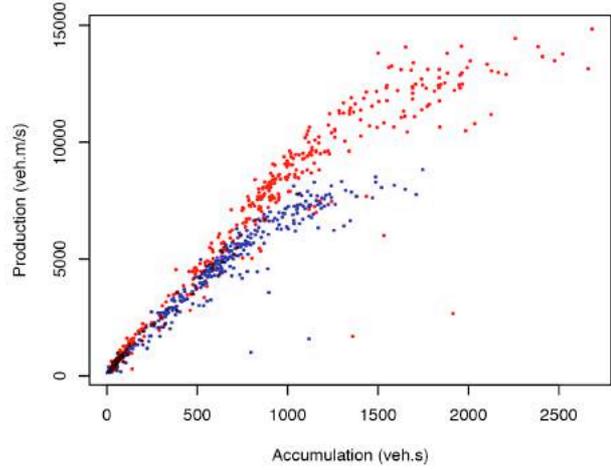
reservoir 5 niveau link= 4 Dt= 18 min



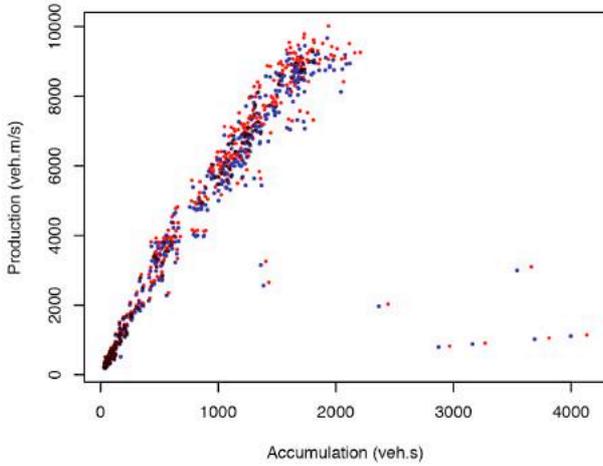
reservoir 6 niveau link= 4 Dt= 18 min



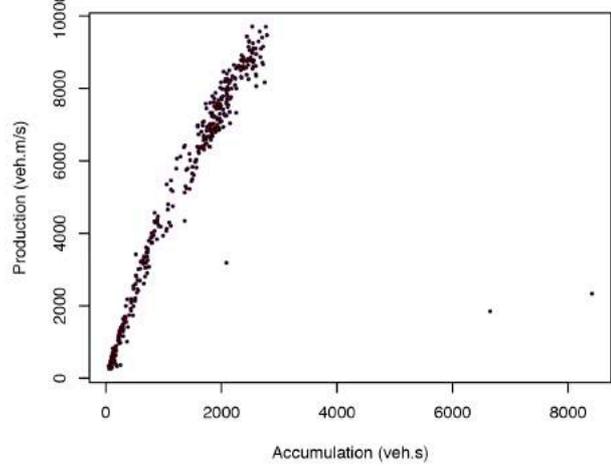
reservoir 7 niveau link= 4 Dt= 18 min



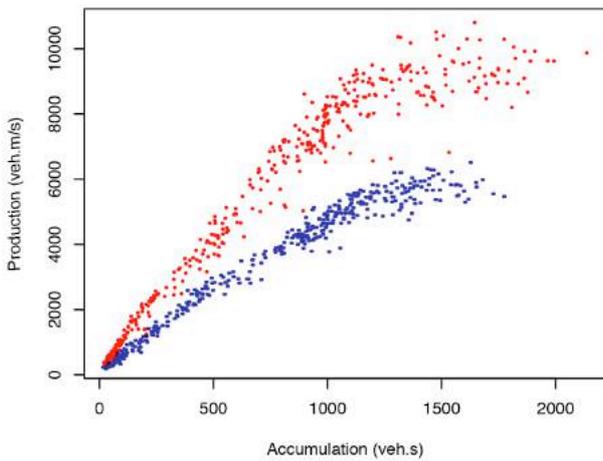
reservoir 8 niveau link= 4 Dt= 18 min



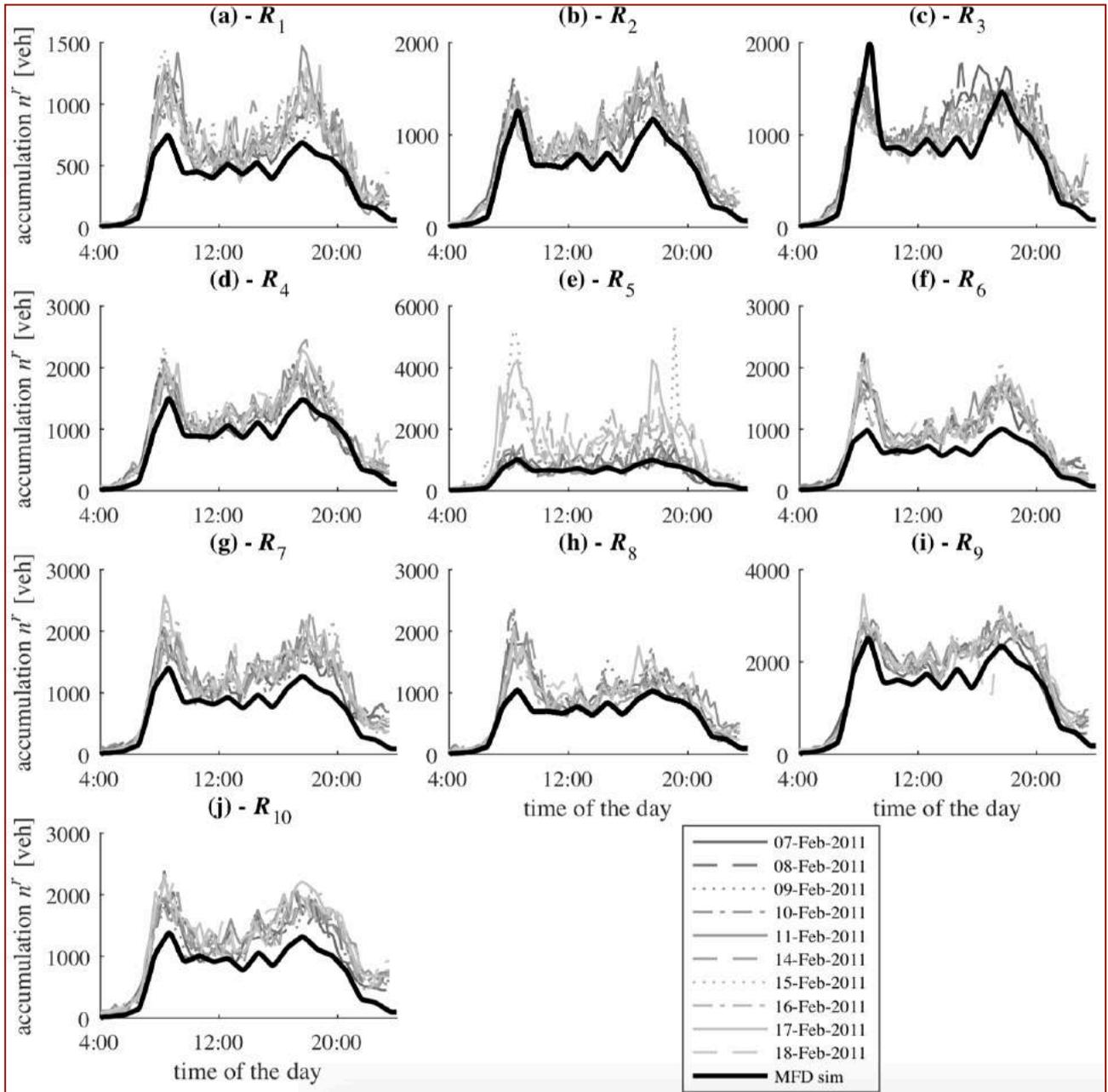
reservoir 9 niveau link= 4 Dt= 18 min



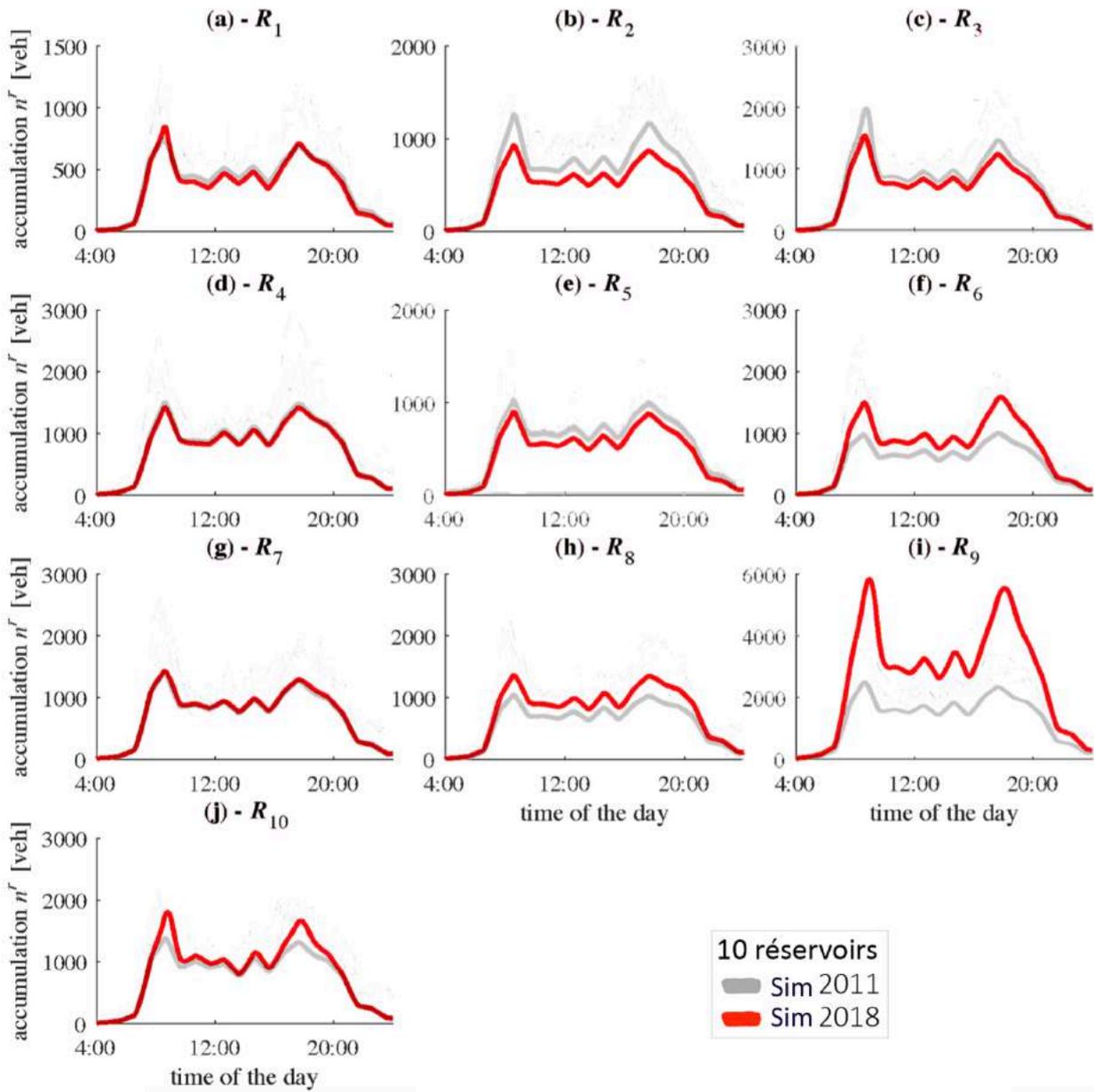
reservoir 10 niveau link= 4 Dt= 18 min



Annexe 3 : Evolution de l'accumulation (en véh) par réservoir pour un découpage en 10 réservoirs à l'année 2011 avec les données du simulateur MFD (en gras noir) et les données empiriques (en gris)



Annexe 4 : Evolution de l'accumulation (en véh) par réservoir pour un découpage en 10 réservoirs avec les données du simulateur MFD 2011 (en gris) et les données du simulateur 2018 (en rouge)



Annexe 5 : Evolution de la vitesse (en m/s) par réservoir pour un découpage en 10 réservoirs à l'année 2011 avec les données du simulateur MFD (en gras noir) et les données empiriques (en gris)

